

УДК 678-419:004.925.84
ББК 35.710.5
Ш67

Электронный архив УГЛТУ



Рецензенты:

кафедра химии и процессов горения Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС; нач. кафедры – доцент С.Н. Пазникова;

кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук Н.П. Кулик

Шкуро, А.Е.

Ш67 Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Мин. системные требования: IBM IntelCeleron 1,3 ГГц; Microsoft Windows XP SP3; Видео-система Intel HD Graphics; дисковод, мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-94984-616-2

Приведены сведения о современном состоянии отрасли трехмерной печати, ее перспективах и направлениях развития. Описаны основные существующие технологии и методы трехмерной печати, пригодные для этих методов материалы. Представлено необходимое программное обеспечение процесса 3D-печати.

Пособие предназначено обучающимся по направлению 18.03.07 «Химическая технология», а также будет полезно специалистам по переработке пластмасс и композитов.

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

**А.Е. Шкуро
П.С. Кривоногов**

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

УДК 678-419:004.925.84
ББК 35.710.5

ISBN 978-5-94984-616-2



9 785949 184616 2

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2017

© А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов, 2017

Минобрнауки России

Электронный архив УГЛТУ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»

А.Е. Шкуро
П.С. Кривоногов

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

Учебное пособие

Екатеринбург
2017

Минобрнауки России

ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»

А.Е. Шкуро
П.С. Кривоногов

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

Учебное пособие

Екатеринбург
2017

УДК 678-419:004.925.84

ББК 35.710.5

Ш67

Рецензенты:

кафедра химии и процессов горения Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС; нач. кафедры – доцент С.Н. Пазникова;

кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук Н.П. Кулик

Шкуро, А.Е.

Ш67

Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Мин. системные требования: IBM IntelCeleron 1,3 ГГц; Microsoft Windows XP SP3; Видеосистема Intel HD Graphics; дисковод, мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-94984-616-2

Приведены сведения о современном состоянии отрасли трехмерной печати, ее перспективах и направлениях развития. Описаны основные существующие технологии и методы трехмерной печати, пригодные для этих методов материалы. Представлено необходимое программное обеспечение процесса 3D-печати.

Пособие предназначено обучающимся по направлению 18.03.07 «Химическая технология», а также будет полезно специалистам по переработке пластмасс и композитов.

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 678-419:004.925.84

ББК 35.710.5

ISBN 978-5-94984-616-2

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2017

© А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О 3D-ПЕЧАТИ	6
1.1. История возникновения 3D-печати	6
1.2. Современное состояние отрасли. Сферы применения 3D-печати	10
1.3. Общие принципы 3D-печати	18
Глава 2. ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ	23
2.1. Экструзионная 3D-печать	23
2.2. Расходные материалы для трехмерной печати методом послойного наплавления	25
2.3. Стереолитография	50
2.4. Технология многоструйного моделирования	56
2.5. Цифровая светодиодная проекция	57
2.6. Масочная стереолитография	59
2.7. Ламинирование	60
2.8. Ламинирование методом селективного осаждения	62
2.9. Струйная трехмерная печать	64
2.10. Электронно-лучевая плавка (проволочная)	66
2.11. Прямое лазерное спекание металлов	67
2.12. Непрямое лазерное спекание металлов	71
2.13. Электронно-лучевая плавка металлов	72
2.14. Селективное лазерное плавление	74
2.15. Селективное тепловое спекание	76
2.16. Селективное лазерное спекание	78
Глава 3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ	81
3.1. Программное обеспечение для трехмерного моделирования.....	81
3.2. Программы для вывода на печать созданных 3D-моделей.....	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	97

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство, или 3D-печать, – процесс создания трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе их цифровых моделей. Концепция 3D-печати основана на построении объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически, 3D-печать является полной противоположностью таким традиционным методам механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала (субтрактивное производство).

Аддитивные технологии бурно развиваются и активно внедряются в нашу жизнь. Согласно данным консалтинговой фирмы Wohlers Associates, в 2012 году объем мирового рынка 3D-принтеров и сопутствующих товаров и услуг достиг 2,2 млрд долларов, при этом показав рост на 29 % по сравнению с 2011 годом.

Объем российского рынка 3D-печати в 2013 году составил около 350 млн рублей, что составляло примерно 0,45 % от мирового рынка. Несмотря на значительное отставание в освоении данной технологии, темпы роста отечественного рынка 3D-принтеров и связанных с ними сервисов впечатляют. По прогнозам специалистов, к 2018 году российский рынок 3D-печати может возрасти до 600 млрд рублей в связи с резким удешевлением 3D-принтеров. В ближайшие несколько лет в России прогнозируется бум интереса к трехмерной печати.

За последнее десятилетие стоимость 3D-принтера сократилась с нескольких десятков тысяч долларов до нескольких сотен и продолжает снижаться по мере развития отрасли. Уже сегодня аддитивное производство стоит на пороге революции: бытовая печать пластиковых изделий собственного дизайна в каждом доме уже скоро не будет чем-то необычным. Согласно исследованиям, домашние 3D-принтеры с открытым исходным кодом позволят отыграть капитальные затраты на собственное приобретение за счет экономичности бытового производства предметов.

Аддитивные технологии широко используются для прототипирования и распределенного производства в архитектуре, строительстве, промышленном дизайне, автомобильной, аэрокосмической, военно-промышленной, инженерной и медицинской отраслях, биоинженерии (для создания искусственных тканей), производстве модной одежды и обуви, ювелирных изделий, в образовании, географических

информационных системах, пищевой промышленности и многих других сферах человеческой деятельности.

В учебном пособии описание различных технологий лежащих в основе трехмерной печати, сопровождается многочисленными иллюстрациями, таблицами данных и яркими примерами из практики.

Пособие предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению 18.03.01 «Химическая технология» (профиль «Химическая технология переработки растительного сырья», специализация «Технология и управление качеством древесных плит и изделий из полимерных композиционных материалов»). Пособие может быть полезно обучающимся по специальности 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства», направленность (профиль) «Технология и дизайн упаковочного производства».

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О 3D-ПЕЧАТИ

1.1. История возникновения 3D-печати

Идею создания первого в истории 3D-принтера часто приписывают авторам телесериала «Звездный путь» – в оригинальных сериях 1966 года было показано устройство для «печати» готовых блюд под названием *Food Synthesizer* (рис. 1.1). В обновленном телесериале 1987 года «Звездный путь: Следующее поколение» устройство переименовали в *Replicator* и наделили куда более широкими возможностями.



Рис. 1.1. Прибор «Food Synthesizer»

В 1984 году американец Чарльз Халл (рис. 1.2) разработал технологию *стереолитографии* для печати 3D-объектов по данным цифровых моделей из фотополимеризующихся композитных материалов. Спустя два года, Халл получил патент на технологию *стереолито-*

графии, основал компанию 3D-Systems и разработал первый коммерческий прибор трехмерной печати. Первый 3D-принтер в истории человечества получил незатейливое название «установка для стереолитографии». Уже в 1988 году в компании 3D-Systems разработали первую модель 3D-принтера, запущенную в серийное производство для широкого круга потребителей.

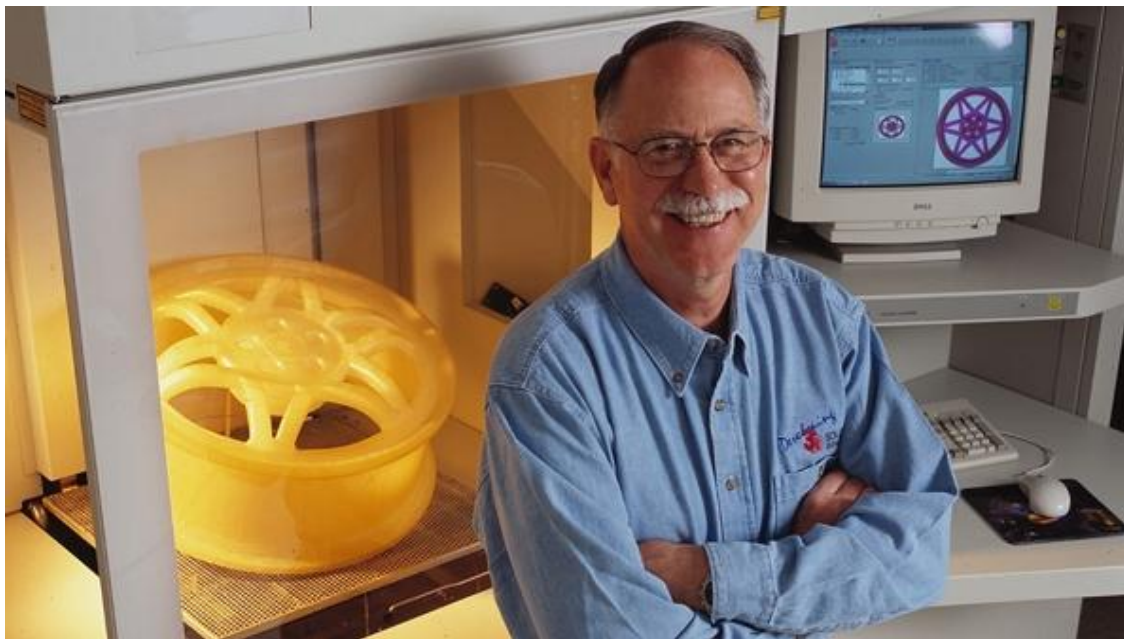


Рис. 1.2. Чарльз Халл, «отец» современной 3D-печати

В 1985 году М. Фейген предложил послойно формировать объемные модели из листового материала: пленок, полиэфиров, композитов, пластмасс, бумаги и т.д., скрепляя между собой слои с помощью разогретого валика. Эта технология получила название *ламинирование*. В 1986 году сотрудники Техасского университета в Остине Карл Декарт и Джо Биман разработали и запатентовали метод селективного лазерного спекания. И, наконец, в 1988 году Скотт Крамп, будущий основатель компании Stratasys, изобрел метод послойного наплавления, получивший наибольшее распространение среди всех методов трехмерной печати.

Таким образом, все базовые технологии 3D-печати были разработаны и запатентованы еще в 80-х годах прошлого века. Но в то время еще не было создано соответствующих условий для бурного развития и роста этой отрасли науки и техники. Однако условия постепенно менялись.

К середине 90-х годов прошлого столетия в мировой экономике сложилась интересная ситуация: фирмы-конкуренты не просто уже боролись за потребителей продукции, но буквально стали выполнять любые их пожелания. Самое важное, что в итоге однообразную продукцию – например, часы и автомобили – прекратили приобретать миллионными партиями. Объем продаж с заводов-производителей сократился до нескольких тысяч штук в одной партии. Это ознаменовало начало эпохи мелкосерийного производства. В конечном итоге компании обнаружили, что разработка форм, лекал и прототипов для все новых и новых моделей обходится слишком дорого.

Примерно тогда же становятся популярными устройства, способные быстро и с минимумом затрат изготавливать модели – станки с ЧПУ (числовым программным управлением). Многие из них так и остались в секторе производства, но интенсивное развитие отдельной ветви эволюции привело к появлению офисных принтеров объемной печати. Так началась история развития 3D-печати.

В 1995 году двумя студентами Массачусетского технологического института был модифицирован струйный принтер. Он создавал изображения не на бумаге, а в специальной емкости, и эти изображения были объемными. Тогда же появились само понятие *3D-печати* и термин *3D-принтер*. Этот метод был запатентован, и теперь используется в созданной теми же студентами компании Z Corporation (рис. 1.3), а также в компании ExOne. Z Corporation до сих пор производит 3D-принтеры, использующие эту технологию.



Рис.1.3. 3D-принтер модели Z402 от Z Corp

История создания 3D-принтера продолжилась с появлением технологии PolyJet, основанной на использовании фотополимерной смолы. При таком способе печати головка принтера «рисует» слой модели с помощью светочувствительной смолы, который моментально засвечивается лампой. Метод оказался выигрышным по многим параметрам: цена его значительно ниже, а высокая точность дает возможность изготовления не просто моделей, но готовых к применению деталей.

С течением времени развитие индустрии 3D-печати ускорялось, появлялись новые фирмы-производители 3D-принтеров, вносящие свой вклад в ее разработку, использовались новые материалы и принципы, размеры и цены устройств становились все меньше: первые 3D-принтеры были огромны, сегодняшние же устройства для трехмерной печати умецаются на столе (за исключением разве что промышленных 3D-принтеров).

Современные трехмерные принтеры становятся все больше похожи на устройства для 2D-печати на бумаге («обычные» принтеры): как по внешнему виду, так и по технологии нанесения «красящего» вещества. Печатаемые современными принтерами модели отличаются еще и высокой механической прочностью, поэтому могут применяться в качестве готовых изделий.

Также стремительно увеличивается и скорость 3D-печати. Своеобразный рекорд был поставлен в 2011 году. Голландский производитель 3D-принтеров Ultimaker развил скорость печати своих аппаратов до 350 мм в секунду. Однако при такой впечатляющей скорости несколько пострадала точность печати. Сейчас этот показатель уже не так удивляет. Рекордом в области минимальных размеров объектов доступных 3D-печати, можно считать достижение австрийских инженеров: в Венском технологическом университете создали трехмерный принтер, печатающий микроскопические объекты разрешением до 100 нм со скоростью 5 мм в секунду.

На первых этапах развития отрасли цена 3D-принтеров была очень велика, а сами принтеры были доступны лишь крупным компаниям. Сегодня же любой человек может приобрести домашний 3D-принтер, цена которого в среднем варьируется от 600 до 1000 долларов.

1.2. Современное состояние отрасли. Сферы применения 3D-печати

Спектр изделий, производимых с помощью аддитивных технологий, чрезвычайно широк и продолжает стремительно расширяться. На сегодняшний день 3D-печать находит применение в следующих сферах человеческой деятельности:

- архитектура,
- строительство,
- промышленный дизайн,
- автомобильная, аэрокосмическая отрасли,
- военно-промышленный комплекс,
- инженерная отрасль,
- медицина,
- биоинженерия (для создания искусственных тканей),
- производство одежды и обуви,
- производство ювелирных изделий,
- образование,
- географические информационные системы,
- пищевая промышленность,
- фармацевтика.

В 2010 году группа ученых Fluid Interfaces Group из Массачусетского Технологического института представила первый 3D-принтер для создания продуктов - «*Cornucopia*». В 2011 году группа исследователей из Университета Эксетера, университета Брюнеля и фирмы Delcam создали первый 3D-принтер, печатающий шоколадом.

Ведущие мировые корпорации активно внедряют 3D-принтеры в качестве основного производственного оборудования. Так, например, компания Adidas выпустила кроссовки *Futurecraft 3D* (рис. 1.4). Концепция этого проекта предполагает печать подошвы кроссовок, исходя из индивидуальных антропометрических особенностей покупателя. В мире профессионального спорта, счет в котором зачастую идет на миллисекунды, уже давно известно, что, чем удобнее обувь, чем больше она учитывает особенности спортсмена, тем выше его результаты. По этой причине изготовление спортивной обуви под индивидуальные особенности спортсмена уже давно не редкость. Отличием и новацией проекта *Futurecraft 3D* является тот факт, что получить кроссовки с подошвой, созданной специально под ногу каждого покупателя, теперь сможет каждый желающий.

Следует отметить, что проект *Futurecraft 3D* являлся своеобразным ответом на создание компанией Nike футбольных бутс с помощью технологий 3D-печати.



Рис. 1.4. Кроссовки Futurecraft 3D

Технологии 3D-печати открывают множество горизонтов для творчества в сфере автомобилестроения. Каждый человек способен создать уникальное, приспособленное только для себя транспортное средство, но вся проблема заключается в том, что клиент чаще всего сам не знает, чего хочет. К тому же подавляющая часть людей не обладает достаточными навыками и знаниями, чтобы спроектировать транспорт, который будет безопасным, функциональным и доступным одновременно.

Если реализовать возможность самостоятельного создания авто, многие существующие правила проектирования будут сильно нарушены, но предполагается, что параллельно могут быть созданы анализирующие технологии, которые будут определять эти нарушения и исправлять их в автоматическом режиме. При этом большая часть параметров пользователя сохранится. По мере улучшения 3D-технологий самостоятельное проектирование, действительно, может стать реальностью.

Главной выгодой для производителей является отсутствие необходимости штамповать тысячи автомобилей с различными конфигурациями, сборками и т. д. Пользователь сам определит функционал своего авто, его внешний вид и отправит проект на производство. Далее программное обеспечение исправит ошибки и недочеты и запустит процесс печати. Компания Tesla Motors практически с начала своего существования практикует подобный подход, собирая аванс с будущих владельцев непосредственно перед стартом производства.

Еще один плюс – улучшение экологии, так как фабрики не будут работать сутками напролет, а конвейеры будут включаться только во время печати.

Существует множество направлений развития отрасли автомобильного производства. Не исключено, что 3D-принтеры полностью заменят огромные конвейеры, заводы и людей. Возможно, трёхмерная печать является лишь промежуточной ступенью развития отрасли, ведущей к еще более продвинутой технологии, которая будет сочетать все преимущества уже известных технологий.

Еще в 2013 году компания Local Motors создала новое чудо — напечатанный на 3D-принтере автомобиль. Strati, как было названо это чудо техники, состоит из 40 деталей, которые были напечатаны примерно за 30 часов. Убедиться в этом можно было на Международной выставке производства и технологий в Чикаго. Таким образом, для выпуска автомобиля потребовался принтер (правда, не совсем обычный), пластик и гранулы углеродного волокна. Весь процесс печати и сборки занял около 44 часов. Для работы был использован 3D-принтер Big Area Additive Manufacturing, способный работать с производительностью 4,5 кг пластика в час. Стоит отметить, что батарея, электромотор, шины, проводка и подвеска были созданы обычным путем.

Осенью 2016 года на выставке SEATEC, которая состоялась в Японии, компания Honda представила первый в своей истории автомобиль, кузовные детали которого были напечатаны на 3D-принтере (рис. 1.5).

В 2013 году 3D-принтер впервые был использован для изготовления оружия. Американский студент-юрист, 24-летний Коди Уилсон, решил самостоятельно проверить нервы властей на прочность. Уилсон стал основателем компании под названием Defense Distributed. Основным предназначением компании стало создание, накопление и распространение информации о разработке и изготовлении огнестрельного оружия методом 3D-печати.



Рис.1.5. Автомобиль «распечатанный» на 3D-принтере

Результатом деятельности Defense Distributed стало создание образца пистолета «Освободитель» (рис. 1.6). Пистолет состоял всего из 16 деталей и отличался предельной простотой. При испытаниях первый образец «Освободителя» взорвался при попытке выстрела боевыми патронами, и уже второй образец пистолета смог выдержать серию из 8 выстрелов.



Рис. 1.6. Пистолет «Освободитель»

С помощью трехмерной печати изготавливаются некоторые детали ракет для Национального агентства США по исследованию космического пространства (NASA). В июле 2013 года успешно прошли испытания двух топливных форсунок, которые показали результаты на уровне деталей, производимых традиционными методами. Во время рабочих тестов форсунки подвергались воздействиям температур более 3000 °С, а также экстремальным уровням давления.

В 2011 году инженерами Университета Саутгемптона был создан первый самолёт, напечатанный на 3D-принтере. Сложность была, скорее, в проектировании модели таким образом, чтобы её можно было распечатать. Модель прекрасно летала.

Перспективнейшим направлением развития аддитивных технологий является печать строительных материалов и непосредственно зданий. Так, в 2016 году инженерами шанхайской компании *WinSun Decoration Design Engineering Co* был сконструирован строительный 3D-принтер, поразивший мировую общественность своими размерами. Его длина составила 150, а ширина 10 метров. Этот аппарат способен всего за несколько часов напечатать здание высотой до 6 метров. В качестве «чернил» этот принтер использует цемент, усиленный стекловолокном. Компания уже применила свое изобретение на практике (рис 1.7). Пока речь идет про недорогое несложное одноэтажное жилье, однако в Shanghai WinSun полны энтузиазма: тестовые образцы обошлись предприятию на 50 % дешевле, чем их аналоги, возведенные при использовании классических методов строительства. Технологии подобного рода интенсивно развиваются в США, Великобритании и Нидерландах.



Рис. 1.7. Дом, построенный с помощью 3D-принтера

Словенская компания BetAbram занялась серийным производством строительных принтеров. На данный момент модельный ряд продукции словенского производителя ограничен тремя моделями. Стоимость бюджетной модели составит 12000 евро, в то время как флагманы линейки будут продаваться по цене от 20000 евро. Учитывая, что аппарат может печатать несущие конструкции, его стоимость полностью себя оправдывает, но что более важно, окупает себя с лихвой. Вполне возможно, что через пару лет каждый желающий сможет купить 3D-принтер для строительства домов на розничном рынке.

Аддитивные технологии в медицине затрагивают самые разные ее отрасли, в том числе хирургию, стоматологию, сурдологию, изготовление коронок, каркасов бюгельных протезов, хирургических шаблонов для имплантации, позвоночных имплантатов, индивидуальных ушных вкладышей для слуховых аппаратов, протезирование конечностей (рис. 1.8). Особые надежды в области медицины возлагаются на развитие трехмерной печати органов.



Рис. 1.8. Имплант-челюсть, распечатанная на 3D-принтере

Первый удачный эксперимент по созданию органов на 3D-принтере состоялся в 2006 году. Группа биоинженеров из Wake Forest Institute for Regenerative Medicine (Винтсон-салем, США) разработала и напечатала мочевые пузыри для семерых подопытных пациентов. Врачи использовали стволовые клетки пациентов для создания искусственного органа. Образцы донорской ткани в специальной герметичной камере с помощью экструдера нанесли поверх макета мочевого

пузыря, нагретого до естественной температуры человеческого тела. Через 8 недель в ходе интенсивного роста и последующего деления клетки был воссоздан человеческий орган.

Ближайшие перспективы аддитивных технологий в области медицины заключаются в создании первых коммерческих биопринтеров и массовой печати протезов и имплантов.

Одним из важных направлений развития 3D-печати является печать собственно 3D-принтеров, или *репликация*. На сегодняшний день полная репликация 3D-принтера невозможна: необходимые электронные и электромеханические компоненты (например, печатные платы) не подлежат печати. Однако предполагается, что в ближайшем будущем эта проблема будет устранена: почти все используемые материалы или их ближайшие аналоги уже были использованы в качестве печатных материалов в различных методах аддитивного производства.

В связи с этим необходимо упомянуть проект *Replicating Rapid Prototype*, или *RepRap*. Целью этого проекта стало создание самокопирующегося 3D-принтера (рис. 1.9). Самокопирование определяется авторами как способность аппарата воспроизводить компоненты, необходимые для создания другой версии себя. Благодаря способности аппарата к самовоспроизводству авторы считают возможным дешево распределять такие устройства между людьми и сообществами, позволяя им создавать (или скачивать из Интернета) сложные продукты без необходимости создания дорогой производственной инфраструктуры. Дальнейшее развитие реплицирующих устройств будет носить эволюционный характер вкупе с возможностью экспоненциально роста числа изготовленных устройств. Планируется, что проект станет одной из «прорывных технологий» наравне с персональным компьютером и интегральными микросхемами.

Стремительно набирают популярность сервисы по созданию 3D-портретов. По аналогии с клеевым пистолетом была реализована идея создания ручного инструмента для 3D-печати. Этот инструмент получил название «3D-ручка» (рис. 1.10). С помощью 3D-ручки вы получаете возможность рисовать в воздухе. Это очередной технологический прорыв в области 3D-моделирования, это гаджет, которому суждено навсегда изменить представление о том, что такое «рисование», ведь теперь вы сможете рисовать не на бумаге, а в пространстве. Устройство напоминает 3D-принтер экструзивного типа, однако сфера его применения по-настоящему велика. С его помощью вы сможете не только практиковаться в рисовании и экспериментировать в

создании художественных шедевров, но и определенно сможете решить множество проблем бытового характера.

На сегодняшний день различают два вида 3D-ручек: холодные и горячие. Холодные печатают быстро затвердевающими смолами. Горячие ручки используют различные термопластические полимеры.

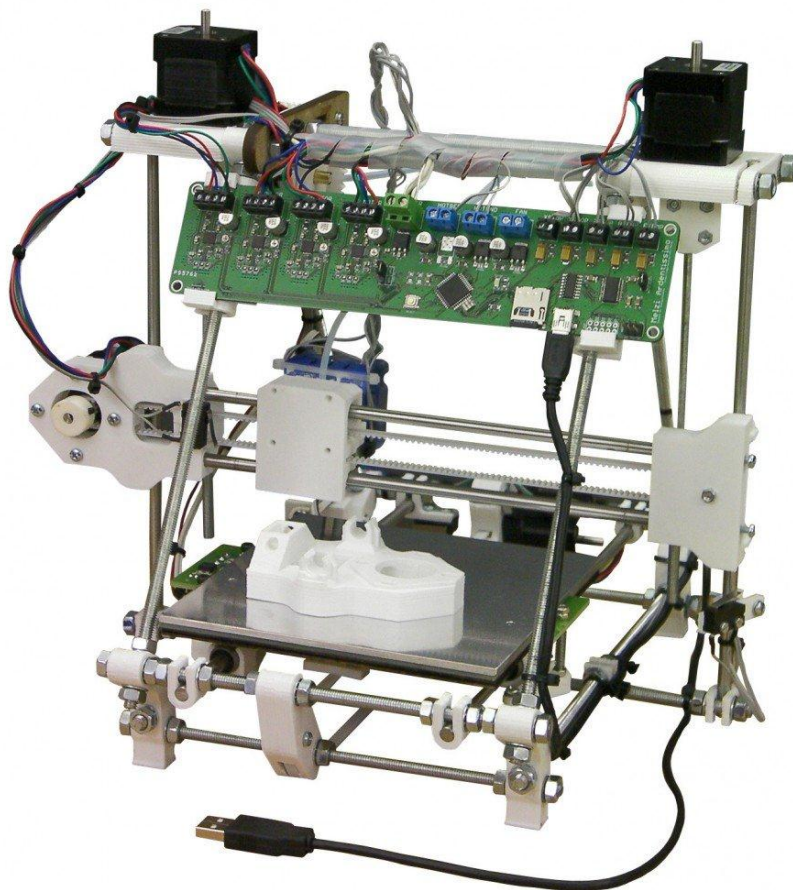


Рис. 1.9. Модель самовоспроизводящего принтера от RepRap



Рис. 1.10. 3D-ручка

Принцип работы горячей 3D-ручки предельно прост. В отличие от обычных приспособлений для письма и рисования, вместо чернил в неё заправляется пластиковая нить. Большинство ручек, доступных на розничном рынке, используют обычный полимерный пруток, который покупается для принтеров, работающих по технологии послойного наплавления.

В задней части корпуса ручки предусмотрено специальное отверстие, в которое вставляется филамент. Встроенный механизм автоматически подводит филамент (полимерную нить) к экструдеру, где он расплавляется и выдавливается в расплавленном виде наружу. Металлический наконечник печатной головки нагревается до температуры 180–220 °С, поэтому при работе с устройством следует придерживаться базовых правил безопасности. Несмотря на то, что 3D-ручки оборудованы встроенным вентилятором для ускорения процесса застывания пластика, небрежное отношение к прибору напрямую связано с риском получить ожог.

1.3. Общие принципы 3D-печати

3D-принтер (рис. 1.11) – это устройство, которое осуществляет трехмерную печать и позволяет создавать материальные объекты по их 3D-моделям. Конструктивные особенности 3D-принтера целиком и полностью зависят от технологии аддитивного производства, положенной в его основу.

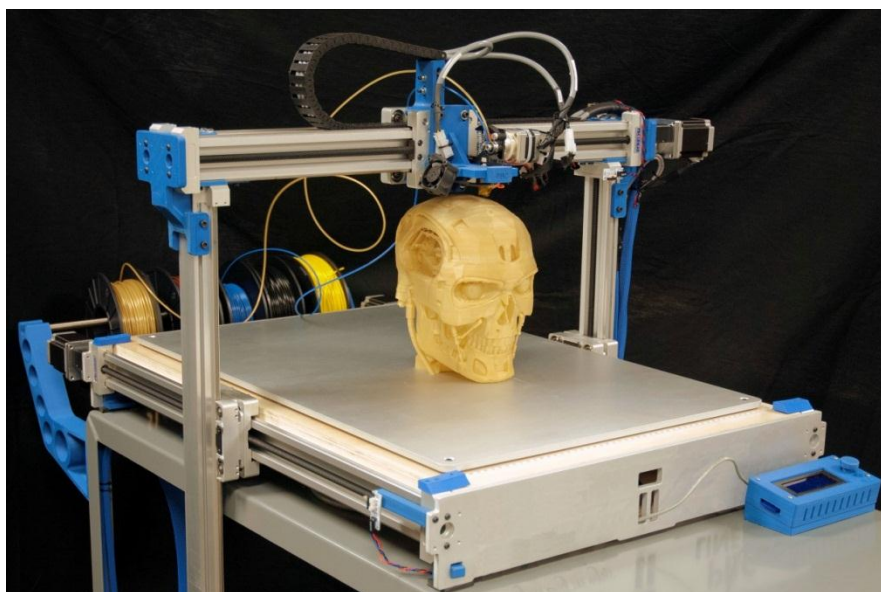


Рис.1.11. 3D-принтер в процессе печати

Автоматизированное аддитивное производство невозможно без источника информации о взаиморасположении элементов объекта печати, его геометрии. Таким источником информации служат цифровые трехмерные модели, или *3D-модели*. Они создаются методом ручного компьютерного графического дизайна или методом 3D-сканирования. Ручное моделирование, или подготовка геометрических данных для создания трехмерной компьютерной графики, несколько напоминает скульптуру. 3D-сканирование – это автоматический сбор и анализ данных реального объекта, а именно формы, цвета и других характеристик, с последующим преобразованием в цифровую трехмерную модель (рис. 1.12).

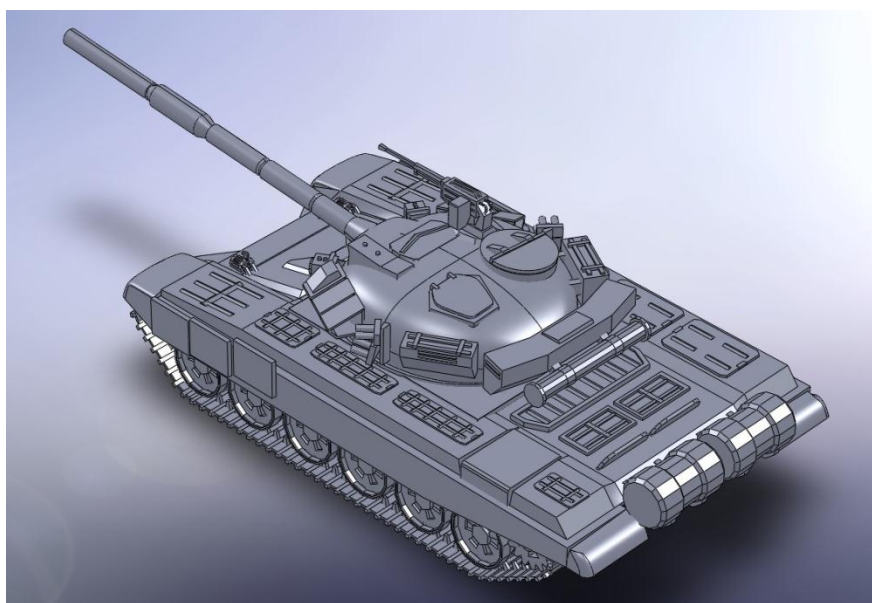


Рис. 1.12. 3D-модель танка

И ручное и автоматическое создание 3D-печатных моделей может вызвать трудности у среднего пользователя. В связи с этим в последние годы получили распространение 3D-печатные торговые площадки. Среди наиболее популярных примеров площадок такие сервисы, как Shapeways, Thingiverse и Threeding.

Построение модели с применением современных технологий занимает от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от используемого метода, а также размера и сложности модели. Промышленные аддитивные системы могут, как правило, сократить время до нескольких часов, но все зависит от типа установки, а также от размера и количества одновременно изготавливаемых моделей.

Во время печати принтер считывает 3D-печатный файл (как правило, в формате STL), содержащий данные трехмерной модели, и наносит последовательные слои жидкого, порошкообразного, бумажного или листового материала, выстраивая трехмерную модель из серии поперечных сечений. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы. Основным преимуществом данного метода является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности.

Разрешение принтера подразумевает толщину наносимых слоев (ось Z) и точность позиционирования печатной головки в горизонтальной плоскости (по осям X и Y). Разрешение измеряется в DPI (количество точек на дюйм) или микрометрах (устаревшим термином является «микрон»). Типичная толщина слоя составляет 100 мкм, хотя некоторые устройства вроде Objet Connex и 3D Systems ProJet способны печатать слоями толщиной от 16 мкм. Разрешение по осям X и Y схоже с показателями обычных двухмерных лазерных принтеров. Типичный размер частиц составляет около 50–100 мкм (от 510 до 250 DPI) в диаметре.

Традиционные производственные методы, такие, как литье под давлением или прессование, могут обходиться дешевле при производстве крупных партий полимерных изделий, но аддитивные технологии обладают преимуществами при мелкосерийном производстве, позволяя достигнуть более высокого темпа производства и гибкости дизайна, наряду с повышенной экономичностью в пересчете на единицу произведенного товара. Кроме того, настольные 3D-принтеры позволяют дизайнерам и разработчикам создавать концептуальные модели и прототипы, не выходя из офиса.

Хотя разрешение принтеров вполне достаточно для большинства проектов, печать объектов со слегка превышенными измерениями и последующей субтрактивной механической обработкой высокоточными инструментами позволяет создавать модели повышенной точности. Примером устройств с подобным комбинированным методом изготовления и обработки служит 3D-принтер LUMEX Avance-25.

Некоторые методы аддитивного производства предусматривают возможность использования нескольких материалов, а также разных цветов в течение одного производственного цикла. Многие из 3D-принтеров используют поддержки, или опоры, во время печати. Опоры необходимы для построения фрагментов модели не соприкасающихся с нижележащими слоями или рабочей платформой. Сами

опоры не являются частью заданной модели и по завершении печати либо отламываются (в случае использования того же материала, что и для печати самой модели), либо растворяются (как правило, в воде или ацетоне – в зависимости от материала, используемого для создания опор).

Технологические особенности процесса трехмерной печати главным образом зависят от технологии аддитивного производства лежащей в основе этого процесса. Классификация основных методов и технологий, применяемых в трехмерной печати на сегодняшний день, представлена в таблице 1.

Таблица 1

Методы и технологии 3D-печати

Метод	Базовая технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластичные полимеры (такие как полилактид (ПЛА), акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластичные полимеры
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластичные полимеры, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка

Окончание табл. 1

Метод	Базовая технология	Используемые материалы
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Поскольку представленные в таблице методы печати существенно различаются по лежащим в их основе принципам, условиям применимости, материалам, форме и функциональному назначению изделий, получаемых с их помощью, уместно будет рассматривать каждый из методов отдельно.

Глава 2

ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

2.1. Экструзионная 3D-печать

Моделирование методом *послойного наплавления* (FDM/FFF), или *экструзии*, было разработано С. Скоттом Трампом в конце 1980-х годов и получило коммерческое распространение в 1990 году силами компании Stratasys, в числе основателей которой числится сам Трамп. В связи с истечением срока действия патента существует большое сообщество разработчиков 3D-принтеров с открытым исходным кодом, а также коммерческих организаций, использующих данную технологию. Как следствие стоимость устройств уменьшилась на два порядка со времени изобретения технологии.

Процесс печати методом послойного наплавления подразумевает создание слоев за счет экструзии быстро застывающего материала в виде микрокапель или тонких струй. Экструдер нагревает материал до температуры плавления с последующим выдавливанием расплавленной массы через сопло. Сам экструдер приводится в движение пошаговыми двигателями или сервомоторами, обеспечивающими позиционирование печатной головки в трех плоскостях. Перемещение экструдера контролируется производственным программным обеспечением, привязанным к микроконтроллеру.

Общая схема устройства 3D-принтера экструзивного типа представлена на рис. 2.1.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого, материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно возможна печать разными цветами

одного и того же вида пластика при создании единой модели. Изделие производится выдавливанием (*экструзией*) и нанесением микрокапель расплавленного термопластичного полимера с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

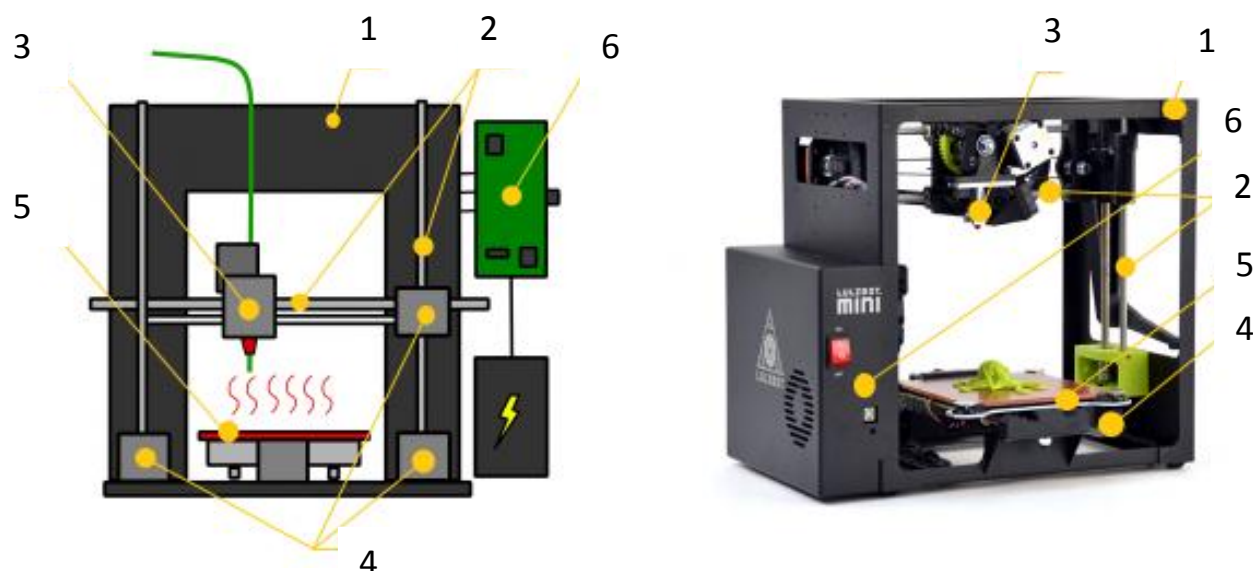


Рис. 2.1. Схема устройства 3D-принтера экструзивного типа:

- 1 – корпус, 2 – закрепленные на нем направляющие,
- 3 – печатающая головка, 4 – шаговые двигатели, 5 – рабочий стол;
- 6 – управляющая электроника

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло перемещается по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования (САПР). Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Как правило, экструдер (также называемый «печатной головкой») приводится в движение пошаговыми моторами или сервоприводами. Наиболее

популярной системой координат, применяемой в технологии FDM, является декартова система, построенная на прямоугольном трехмерном пространстве с осями X, Y и Z. Альтернативой является цилиндрическая система координат, используемая так называемыми дельта-роботами.

Как наиболее распространенный и коммерчески доступный способ трехмерной печати, метод послойного наплавления обладает самым широким спектром расходных материалов (*филаментов*). В качестве расходных материалов для экструзионной печати используются различные виды полимеров, включая акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик), поликарбонат (ПС), полилактид (полимолочная кислота, ПЛА), полиэтилен высокого давления (ПЭВД, ПЭНП), смеси поликарбоната и АБС-пластика, полифениленсульфон и др. Как правило, полимер поставляется в форме наполнителя, изготовленного из чистого пластика.

В сообществе энтузиастов 3D-печати существует несколько проектов, направленных на переработку использованного пластика в материалы для 3D-печати. Проекты основаны на выработке расходных материалов с помощью шредеров и переплавляющих устройств.

Технология послойного наплавления имеет определенные ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, создание навесных конструкций (таких, как сталактиты) невозможно само по себе ввиду отсутствия необходимой поддержки. Это ограничение компенсируется созданием временных опорных конструкций, удаляемых по завершении печати. Главным же достоинством данной технологии является ее доступность: чтобы собрать экструзионный 3D-принтер в домашних условиях потребуется вложить всего 30–40 тысяч рублей.

2.2. Расходные материалы для трехмерной печати методом послойного наплавления

Полилактид (полимолочная кислота, ПЛА, polylactic acid, PLA) – один из наиболее широко используемых в 3D-печати полимеров. Это биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир (рис. 2.2), мономером которого является молочная кислота.

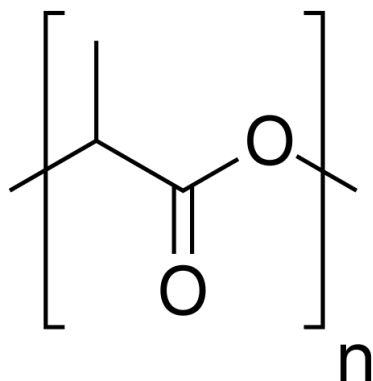


Рис. 2.2. Химическая формула полилактида

Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие, как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Распространённость полилактида в аддитивном производстве обуславливается сразу двумя факторами. Во-первых, полилактид полностью безопасен для окружающей среды. Во-вторых, поскольку он является полимером молочной кислоты, полилактид полностью биоразлагаем.

В то же время способностью полилактида к биоразложению обуславливается его недолговечность. Пластик легко впитывает воду и относительно мягок. Как правило, модели из ПЛА не предназначаются для функционального использования, а служат в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек. Среди немногих практических промышленных применений полилактида можно отметить производство упаковки для пищевых продуктов, контейнеров для лекарственных препаратов и хирургических нитей, а также использование в подшипниках, не несущих высокой механической нагрузки (например, в моделировании), что возможно благодаря отличному коэффициенту скольжения материала.

Одним из наиболее важных преимуществ применения ПЛА в 3D-печати служит низкая температура плавления – всего 170–180 °С, что способствует относительно низкому расходу электроэнергии и возможности использования недорогих сопел из латуни и алюминия. Температура плавления материала зависит от степени его кристалличности и может варьироваться в широких пределах. Как правило, экструзия проводится при 160–170 °С. В то же время полилактид достаточно медленно застывает (температура стеклования составляет

около 50 °С), что следует учитывать при выборе 3D-принтера. Оптимальным вариантом является устройство с корпусом открытого типа, подогреваемой рабочей платформой (во избежание деформаций моделей большого размера) и, желательно, дополнительными вентиляторами для охлаждения свежих слоев модели.

Полилактид характеризуется низкой усадкой, т. е. потерей объема при охлаждении, что способствует предотвращению деформаций. Тем не менее, усадка имеет кумулятивный эффект при увеличении габаритов печатаемых моделей. В последнем случае может потребоваться подогрев рабочей платформы для равномерного охлаждения печатаемых объектов.

Плотность ПЛА варьируется от 1200 до 1400 кг/м³. Стоимость полилактида относительно невелика, что добавляет популярности этому материалу. Усредненные эксплуатационные характеристики полилактида представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1

Эксплуатационные характеристики полилактида

Показатель	Значение
Температура плавления, °С	170–180
Температура размягчения, °С	50
Твердость (по Роквеллу), R	70–90
Относительное удлинение при разрыве, %	3,8
Прочность при изгибе, МПа	55,3
Прочность на разрыве, МПа	57,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,3
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,3
Температура стеклования, °С	60–65
Плотность, г/см ³	1,23–1,38
Минимальная толщина стенок, мм	1
Точность печати, %	± 0,1
Размер мельчайших деталей, мм	0,3
Усадка при изготовлении изделий,	–
Водопоглощение, %	0,5–50

АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, ABS) – на сегодняшний день это самый популярный полимер из используемых в 3D-печати. АБС-пластик – это ударопрочный термопластичный

полимер, полученный сополимеризацией акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции этих компонентов (рис.2.3) в составе АБС-пластика могут варьироваться в пределах 15—35 % для акрилонитрила, 5—30 % для бутадиена и 40—60 % для стирола.

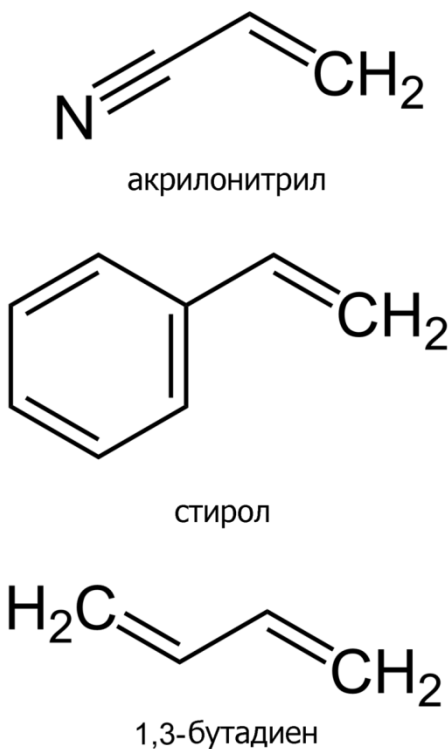


Рис. 2.3. Мономеры для синтеза АБС-пластика

Широкое распространение АБС-пластика обуславливается отличными механическими свойствами (табл. 2.2), долговечностью и низкой стоимостью этого материала. АБС-пластик получил широкое применение в промышленности. Он применяется для изготовления:

- деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решётки);
- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок;
- пультов управления;
- телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;

- спортивного инвентаря;
- деталей оружия;
- мебели (рис 2.4);
- сантехники;
- выключателей и тумблеров;
- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- игрушек и детских конструкторов;
- чемоданов и контейнеров;
- деталей медицинского оборудования и медицинских принадлежностей;
- смарт-карт.

Кроме того, АБС-пластик применяется как добавка, повышающая теплостойкость и улучшающая перерабатываемость композиционных материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ), как добавка, повышающая ударную вязкость полистирола, а также как добавка снижающая цену поликарбонатов.

Таблица 2.2

Свойства АБС-пластиков для 3D-печати

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	~ 105
Прочность на изгиб, МПа	41
Предел прочности на разрыв, МПа	22
Модуль упругости при растяжении, МПа	1627
Относительное удлинение, %	6
Усадка при охлаждении, %	До 0,8
Плотность материала, г/см ³	~ 1,05

АБС-пластик устойчив к влаге, кислотам и маслу, имеет достаточно высокие показатели термоустойчивости – от 90 °С до 110 °С. К сожалению, некоторые виды материала разрушаются под воздействием прямого солнечного света, что несколько ограничивает применение. В то же время АБС-пластик легко поддается окраске, что позволяет наносить защитные покрытия на немеханические элементы.



Рис. 2.4. Стулья из АБС-пластика

Несмотря на относительно высокую температуру стеклования (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), АБС-пластик имеет относительно невысокую температуру плавления. Ввиду аморфности материала АБС-пластик не имеет точки плавления как таковой, но приемлемой для экструзии считается температура в пределах $180\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (примерно на одном уровне с полилактидом). Низкий интервал между температурами экструзии и стеклования способствует более быстрому застыванию АБС-пластика по сравнению с полилактидом.

Основным минусом АБС-пластика можно считать высокую степень усадки при охлаждении – материал может потерять до $0,8\%$ объема. Этот эффект может привести к значительным деформациям модели, закручиванию первых слоев и растрескиванию. Для борьбы с этими неприятными явлениями используются два основных решения. Во-первых, применяются подогреваемые рабочие платформы, способствующие снижению градиента температур между нижними и верхними слоями модели. Во-вторых, 3D-принтеры для печати АБС-пластиком зачастую используют закрытые корпуса и регулировку фоновой температуры рабочей камеры. Это позволяет поддерживать температуру нанесенных слоев на отметке чуть ниже порога стеклования, снижая степень усадки. Полное охлаждение проводится после получения готовой модели.

Относительно низкая «липучесть» АБС-пластика может потребовать дополнительных средств для схватывания с рабочей поверхностью, таких, как клейкая лента, полиимидная пленка или нанесение раствора АБС-пластика в ацетоне на платформу непосредственно перед печатью.

В то время как при комнатной температуре АБС-пластик не представляет угрозы здоровью, при нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление. Хотя объемы производимого акрилонитрата при маломасштабной печати незначительны, рекомендуется печатать в хорошо проветриваемых помещениях или предусмотреть вытяжку. Не рекомендуется использовать АБС-пластик для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно для хранения горячей пищи или алкогольных напитков) или игрушек для маленьких детей.

Хорошая растворимость АБС-пластика в ацетоне весьма полезна, так как позволяет производить большие модели по частям с последующим склеиванием, что значительно расширяет возможности недорогих настольных принтеров.

Некоторые виды АБС-пластики могут разрушаться под воздействием солнечного света.

Поливиниловый спирт (ПВС, *poly(vinyl alcohol)*, PVA, PVAL) – искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер рис. 2.5). Синтез поливинилового спирта осуществляется реакцией щелочного либо кислотного гидролиза или алкоголиза сложных поливиниловых эфиров. ПВС – твердый полимер белого цвета без вкуса и запаха, нетоксичен. ПВС может кристаллизоваться при термообработке в интервале 80–225 °С, достигая степени кристалличности (68 %). Макромолекулы поливинилового спирта обычно содержат 1,0–2,5 % звеньев, присоединенных по типу «голова к голове», и имеют атактическое строение. Молекулярная масса ПВС в зависимости от способа получения лежит в пределах 5000 – 1000000 а. е.

В отличие от большинства полимеров на основе виниловых мономеров, ПВС не может быть получен непосредственно из соответствующего винилового спирта (ВС). Основным сырьем для получения ПВС служит поливинилацетат (ПВА).

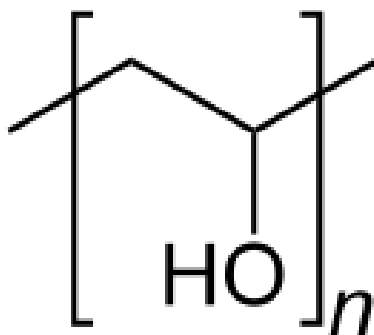


Рис. 2.5. Химическая формула ПВС

Помимо трехмерной печати поливиниловый спирт широко применяется в различных отраслях промышленности, например в качестве:

- клея для бумаги и плит;
- загустителя и модификатора клеев на основе поливинилацетата;
- клея для текстильных материалов;
- покрытий;
- водорастворимых пленок;
- глазных капель и смазок жестких контактных линз;
- армирующих добавок в бетоны;
- сырья для поливинилнитрата;
- поверхностно-активных веществ (ПАВ);
- защитных перчаток;
- агента эмболизации в медицинских процедурах.

Поливиниловый спирт обладает уникальными свойствами и особой областью применения. Главной особенностью ПВС является его водорастворимость. 3D-принтеры, оснащенные двойными экструдерами, имеют возможность печати моделей с опорными структурами из ПВС (рис. 2.6). По завершении печати опоры могут быть растворены в воде, оставляя готовую модель, не требующую механической или химической обработки. Подобным образом поливиниловый спирт можно применять для создания водорастворимых мастер-моделей для литейных форм и самих литейных форм.

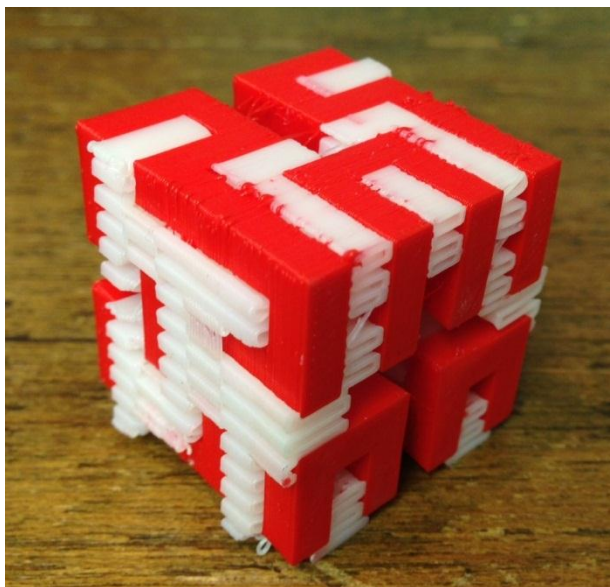


Рис. 2.6. Модель, распечатанная из АБС-пластика (красный) и ПВС-пластика (белый). Опорные конструкции из ПВС подлежат удалению простым растворением в воде

Механические свойства ПВС достаточно интересны (табл. 2.3). При низкой влажности пластик обладает высокой прочностью на разрыв. При повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность. Температура экструзии составляет 160–175 °С, что позволяет использовать ПВС в принтерах, предназначенных для печати АБС- и ПЛА-пластиками.

Таблица 2.3

Свойства поливинилового спирта

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	5000–200000
Степень кристалличности, %	30–70
Плотность, г/см ³	1,27–1,3
Температура плавления, °С	220–230
Температура стеклования, °С	85–90
Температура деструкции, °С	230
Теплостойкость по Мартенсу, °С	140
Теплостойкость по Вика, °С	160
Предел прочности при растяжении, МПа	60–120
Относительное удлинение при растяжении, %	10–30

Так как материал легко впитывает влагу, рекомендуется хранить ПВС-пластик в сухой упаковке и при необходимости просушивать перед использованием. Сушку можно проводить в гончарной печи или обыкновенной духовке. Как правило, просушка стандартных катушек занимает 6–8 часов при температуре 60–80 °С. Нагревание выше температуры 220 °С приведет к разложению пластика, что необходимо учитывать при печати.

Нейлоном называют представителей семейства синтетических полиамидов, используемых преимущественно в производстве волокон. Под этим термином чаще всего понимаются полигексаметиленадипинамид (анид или нейлон-66), либо поли-ε-капроамид (капрон или нейлон-6). Химические формулы основных разновидностей нейлона показаны на рис. 2.7. Две эти разновидности нейлона очень схожи. С точки зрения 3D-печати основным различием является температура плавления: нейлон-6 плавится при температуре 220 °С, а нейлон-66 при 265 °С (табл. 2.4). Наиболее популярным в трехмерной печати является нейлон-66. Этот полимер был разработан американской компанией DuPont в 1935 году.

Таблица 2.4

Свойства нейлонов

Свойства	ПА-66	ПА-6
Степень кристалличности, %	40–60	
Плотность, г/см ³	1,14–1,15	1,13–1,15
Модуль упругости, МПа	1700	1100
Ударная вязкость с надрезом, по Шарпи, кДж/м ²	12	20
Температура плавления, °С	260	222
Относительное удлинение при растяжении, %	16–60	
Водопоглощение, %	2,50	3,00
Плотность сухого материала, г/см ³	1,14	1,14

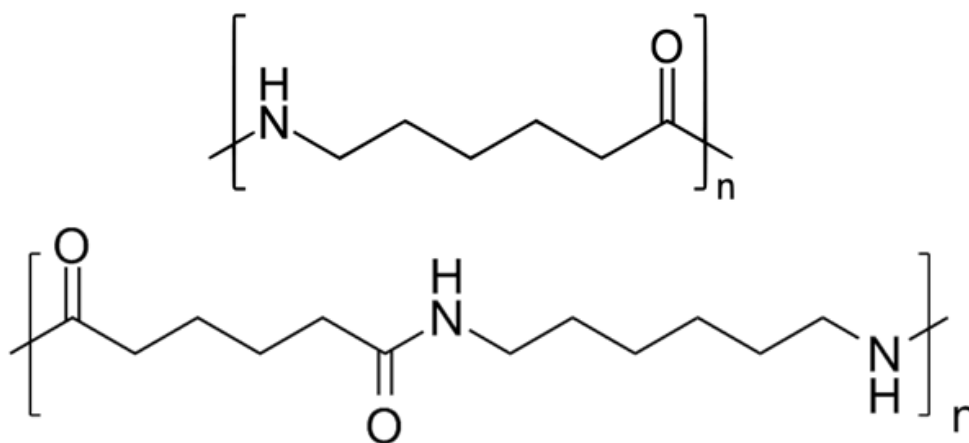


Рис. 2.7. Химическая формула нейлона (капрон - сверху, ангид – снизу)

В кристаллических участках макромолекулы нейлонов имеют конформацию плоского зигзага с образованием с соседними молекулами водородных связей между атомами кислорода карбонила и атомами водорода соседних амидных групп. Вследствие этого нейлоны обладают лучшими по сравнению с полиэфирами и полиолефинами, физико-механическими свойствами: более высокой степенью кристалличности (40–60 %) и температурами стеклования и плавления.

При повышении степени кристалличности нейлонов их прочностные характеристики улучшаются, такое повышение кристалличности происходит и при холодной вытяжке волокна на 400–600 %, происходящая при этом ориентация макромолекул в направлении вытяжки ведет к повышению кристалличности и упрочнению волокна в 4–6 раз.

В промышленности нейлон применяется для изготовления втулок, вкладышей, пленок и тонких покрытий. Нейлон, нанесенный на трущиеся поверхности в виде облицовки или тонкослойного покрытия на тонкие металлические втулки, вкладыши и корпуса подшипников, повышает их эксплуатационные качества. В подшипниковых узлах трения удельные давления, диапазон рабочих температур примерно такие же, как у баббита. Нейлон имеет низкий коэффициент трения и низкую температуру на трущихся поверхностях. Коэффициент трения у нейлона при работе по стали без смазки или при недостаточной смазке равен 0,17–0,20, с масляной смазкой – 0,014–0,020, с водой в качестве смазки – 0,02–0,05. Хорошие антифрикционные свойства позволяют применять нейлон в парах трения без смазки или при недостаточной смазке. Лучшим смазывающим материалом для композитов на основе нейлона являются минеральные масла, эмульсии и вода. При температурах до 150 °С на нейлон не влияют минеральные масла, консистентные смазки. Он не растворяется в большинстве органических растворителей, не поддается воздействию слабых растворов кислот, щелочей и солёной воды.

Нейлоны при нагревании на воздухе подвергаются термоокислительной деструкции, ведущей к снижению прочностных характеристик: при выдерживании на воздухе при температурах 100–120 °С предел прочности на растяжение снижается в 5–10 раз. Деструкция ускоряется под воздействием ультрафиолетового излучения.

Нейлон привлекателен своей высокой износоустойчивостью и низким коэффициентом трения. Так, нейлон зачастую используется для покрытия трущихся деталей, что повышает их эксплуатационные качества и даже позволяет функционировать без смазки. Вслед за широким применением нейлона в промышленности материалом заинтересовались и в сфере аддитивного производства. Попытки печатать нейлоном предпринимались практически с первых дней появления технологии послойного наплавления.

Многие любители предпочитают использовать нейлоновые нити, доступные в широкой продаже, такие, как проволока для садовых триммеров. Диаметр таких нитей часто соответствует диаметру стандартных экструзионных расходных материалов, что делает их использование весьма заманчивым. В то же время подобные продукты, как правило, не являются чистым нейлоном. В случае с прутками для триммеров материал состоит из нейлона и стеклопластика (для оптимального сочетания гибкости и жесткости). Высокая прочность нейлона делает его незаменимым при изготовлении парашютных

тканей, строп и лямок; во время Второй мировой войны большая часть нейлона использовалась именно для этих целей. Высокая прочность и хорошая гибкость дают возможность использовать нейлон в качестве швейных ниток, лент и канатов (рис. 2.8). Существует множество и других областей, где нейлон находит применение, однако в наибольшей степени превосходные свойства нейлона проявляются в трикотажных изделиях. Предполагается, что нейлон в возрастающих количествах будет использоваться также в ковровом производстве. У нейлоновых ковров продолжительный срок службы даже в тяжелых условиях эксплуатации, они меньше загрязняются и легко чистятся.



Рис. 2.8. Нейлоновая лента

В последнее время предпринимаются попытки коммерческой разработки печатных материалов на основе нейлона специально для устройств печати эрозионного типа, в том числе Nylon-PA6 и Taulman 680. Указанные марки подлежат экструзии при температуре 230–260 °С.

Так как нейлон легко впитывает влагу, расходный материал следует хранить в вакуумной упаковке или контейнере с абсорбирующим агентом. Признаком чрезмерно влажного материала является пар, исходящий из сопла во время печати. Это неопасно, однако может значительно ухудшить качество модели.

При печати нейлоном не рекомендуется использовать полиимидное покрытие рабочего стола, так как эти материалы легко сплавляются друг с другом. В этом случае в качестве покрытия рекомендуется применять липкую ленту с восковой пропиткой (masking tape). Использование подогреваемой платформы позволяет снизить возможность деформации модели аналогично печати АБС-пластиком. В связи с низким коэффициентом трения нейлона следует использовать экструдеры с шипованными протягивающими механизмами.

Слои нейлона, наносимые принтером, имеют отличную адгезию друг к другу, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Однако после застывания нейлон плохо поддается склеиванию, поэтому печать крупных моделей из составных частей затруднительна. Альтернативой склеиванию может являться сплавка. Так как при нагревании нейлона возможно выделение токсичных паров, рекомендуется печатать в хорошо вентилируемых помещениях или с использованием вытяжки.

Поликарбонаты – термопластичные полимеры, представляющие собой сложные полиэфиры угольной кислоты и различных двухатомных спиртов. Общая формула поликарбонатов имеет следующий вид: $(-O-R-O-CO-)_n$. Наибольшее промышленное значение имеют ароматические поликарбонаты, в первую очередь, поликарбонат на основе бисфенола А (рис. 2.9). Это объясняется широкой доступностью бисфенола А, который может быть синтезирован конденсацией фенола и ацетона.

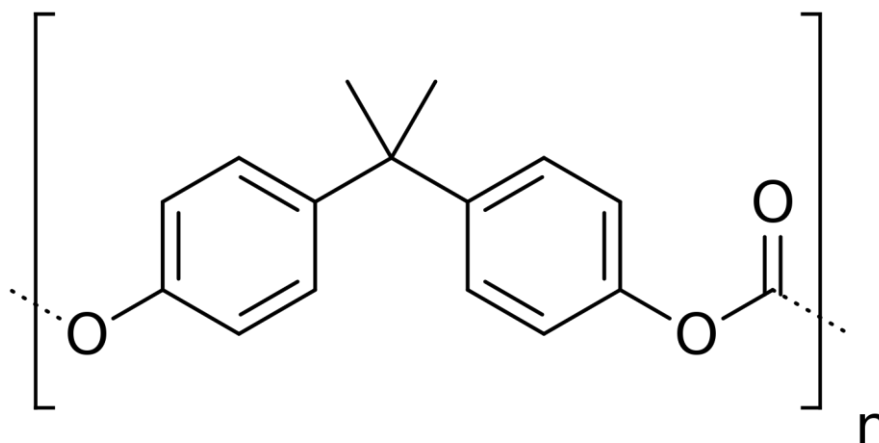


Рис. 2.9. Химическая формула поликарбоната, полученного на основе бисфенола А

Поликарбонаты привлекательны за счет своей высокой прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким

температурам (табл. 2.5). Стоит отметить потенциальный риск для здоровья при печати: в качестве сырья зачастую используется токсичное и канцерогенное соединение бисфенол А. Остаточный бисфенол А может содержаться в готовых изделиях из поликарбоната и испаряться при нагревании. Поэтому печать моделей из поликарбоната, как и из нейлона, рекомендуется проводить в хорошо вентилируемых помещениях.

Таблица 2.5

Свойства поликарбоната на основе бисфенола А

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	20000–120000
Степень кристалличности, %	аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура размягчения, °С	220
Температура стеклования, °С	150
Температура деструкции, °С	310–320
Теплостойкость по Вика, °С	150–155
Предел прочности при растяжении, МПа	65–70
Предел прочности при изгибе, МПа	95

Температура экструзии поликарбоната зависит от скорости печати. Высокие скорости при низких температурах могут стать причиной растрескивания изделий. Минимальной температурой при скорости печати 30 мм/с можно считать 265 °С. При печати рекомендуется использовать полиимидную пленку для лучшего схватывания с поверхностью рабочего стола. Высокая склонность поликарбоната к деформации требует использования подогреваемой платформы и, при возможности, закрытого корпуса с подогревом рабочей камеры.

Поликарбонат обладает высокой гигроскопичностью (легко поглощает влагу из атмосферы), поэтому необходимо хранить материал в сухих условиях во избежание образования пузырьков в наносимых слоях. В случае длительной печати во влажном климате может потребоваться хранение рабочей катушки во влагозащитном контейнере.

Полиэтилен – термопластичный полимер этилена, относящийся к классу полиолефинов (рис. 2.10). Полиэтилен - самый распространённый пластик в мире.

В зависимости от способа получения различают полиэтилен высокого давления, или низкой плотности (ПЭВД), и полиэтилен низкого давления, или высокой плотности (ПЭНД). Они отличаются друг от друга структурой макромолекул (наличием у полиэтилена высоко-

го давления длинноцепочечных ответвлений), а следовательно, и свойствами (табл. 2.6).

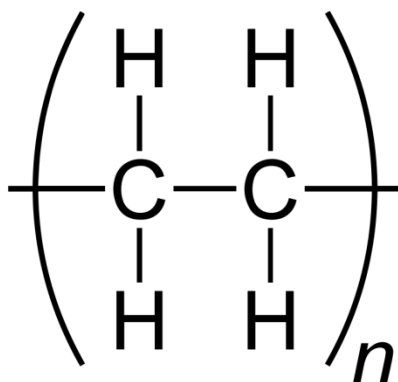


Рис. 2.10..Химическая формула полиэтилена

Таблица 2.6

Свойства полиэтилена

Показатель	Значение	
	ПЭВД	ПЭНД
Молекулярная масса, а.е.	30000–40000	50000–5000000
Степень кристалличности, %	60	70–90
Плотность, г/см ³	0,913–0,930	0,910–0,970
Температура плавления, °С	105–120	125–140
Твердость по Бринеллю, МПа	15–25	50–70
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	–	2–45
Предел прочности при растяжении, МПа	9–16	10–30
Относительное удлинение при растяжении, %	100–800	50–1200

Полиэтилен легко плавится (при 130–145 °С) и быстро застывает (при 100–120 °С), вследствие чего наносимые слои зачастую не успевают схватываться. Полиэтилен отличается высокой усадкой, что провоцирует закрутку первых слоев и деформацию моделей в целом при неравномерном застывании. Печать полиэтиленом требует использования подогреваемой платформы и рабочей камеры с аккуратной регулировкой температурного режима для замедления остывания нанесенных слоев. Кроме того, потребуется проводить печать на высокой скорости.

Полиэтилен относительно мало представлен среди материалов для трехмерной печати. Причиной тому служат сложности при послойном изготовлении моделей.

Трудности в использовании с лихвой компенсируются дешевизной и общедоступностью этого материала. В последнее время были разработаны несколько устройств для переработки пластиковых отходов ПЭНД (бутылок, пищевой упаковки и пр.) в стандартные нити для печати на экструзионных принтерах. Примерами служат FilaBot и RecycleBot. За счет простоты конструкции устройства RecycleBot зачастую собираются силами энтузиастов. При плавлении полиэтилена происходит эмиссия паров вредных веществ, поэтому рекомендуется проводить печать в хорошо вентилируемых помещениях.

Полипропилен (ПП) – термопластичный полимер пропилена (рис. 2.11). Полипропилен широко применяется в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцов, труб, нетканых материалов и электроизоляции. Полипропилен имеет низкую плотность, нетоксичен, обладает высокой химической стойкостью, устойчив к влаге и износу и достаточно дешев (табл. 2.7). Среди недостатков полипропилена следует отметить низкую морозостойкость (при отрицательных температурах материал становится хрупким) и уязвимость к прямому воздействию солнечного света.

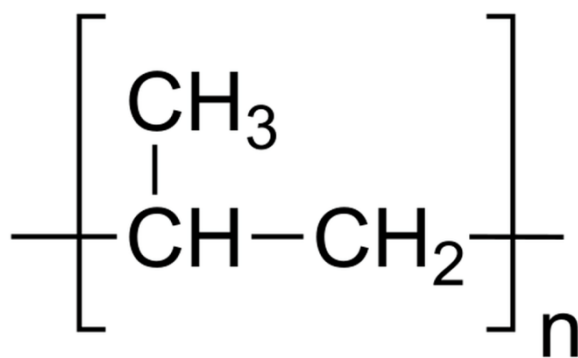


Рис. 2.11. Химическая формула полипропилена

Главной трудностью при печати полипропиленом является высокая усадка материала при охлаждении – до 2,4 %. Для сравнения: усадка АБС-пластика составляет 0,8 %. Несмотря на то, что полипропилен хорошо прилипает к холодным поверхностям, рекомендуется проводить печать на подогреваемой платформе для предотвращения деформации моделей. Минимальная рекомендуемая температура экструзии полипропилена составляет 220 °С.

Таблица 2.7

Свойства полипропилена

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	75000-300000
Степень кристалличности, %	до 75%
Плотность, г/см ³	0,90-0,91
Температура плавления, °С	160-180
Температура стеклования, °С	От -10 до -20
Морозостойкость, °С	От -5 до -25
Теплостойкость (по Вика), °С	95-110
Предел прочности при растяжении, МПа	30-35
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	5-12

Полипропиленовые нити для печати предлагаются на продажу компаниями Orbi-Tech, German RepRap, Qingdao TSD. Компания Stratasys разработала имитатор полипропилена, оптимизированный для 3D-печати, под названием Endur.

Поликапролактон – биоразлагаемый полиэфир, синтезируемый из ε-капролактона (рис. 2.12). Главной отличительной чертой поликапролактона является чрезвычайно низкая температура плавления – 60 °С. Благодаря этому материал идеально подходит для моделирования и быстрого прототипирования. Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных препаратов США поликапролактон разрешен для биомедицинского применения. Перспективным направлением применения материала является производство саморассасывающихся имплантов и хирургических нитей.

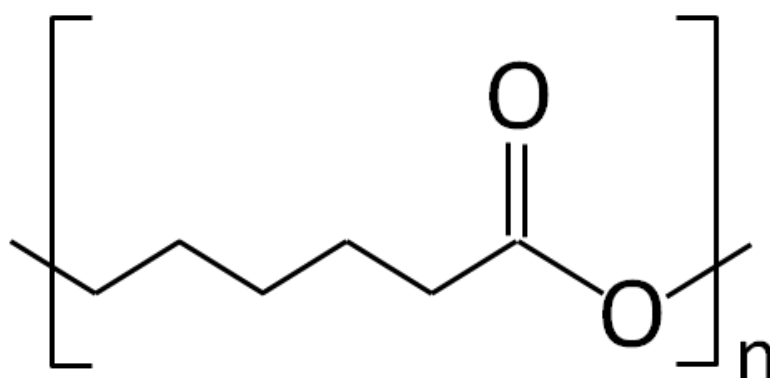


Рис. 2.12. Химическая формула поликапролактона

Легкоплавкость поликапролактона приводит к определенным трудностям при трехмерной печати, так как далеко не все 3D-принтеры можно настроить для работы при столь низких температурах. Нагревание поликапролактона до привычных экструзионных температур (около 200 °С) вызывает потерю механических свойств и может привести к поломке экструдера.

Поликапролактон нетоксичен, что обуславливает его применение в медицинской отрасли, и биоразлагаем. При попадании в организм поликапролактон распадается, что делает печать этим материалом безопасной. Благодаря низкой температуре плавления отсутствует опасность ожогов при прикосновении к свежим моделям. Высокая пластичность материала делает возможным многократное использование. Плотность поликапролактона составляет 1,15 г/см³.

Поликапролактон малоприспособлен для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости (температура стеклования составляет 60 °С) и низкой теплостойкости. С другой стороны, этот материал прекрасно подходит для производства макетов и пищевой упаковки. Материал легко слипается с поверхностью даже холодного рабочего стола и легко поддается окраске.

Полифенилсульфон – высокопрочный термопластичный полимер (рис. 2.13), активно применяемый в авиационной промышленности. Материал имеет прекрасную химическую и тепловую устойчивость и практически не горит. Полифенилсульфон биологически инертен, что позволяет использовать этот материал для производства посуды и пищевых контейнеров. Диапазон эксплуатационных температур полифенилсульфона составляет от -50 до +180 °С. Материал устойчив к воздействию растворителей и горюче-смазочных материалов. Плотность полифенилсульфона составляет 1,29 г/см³, предел текучести 76 МПа.

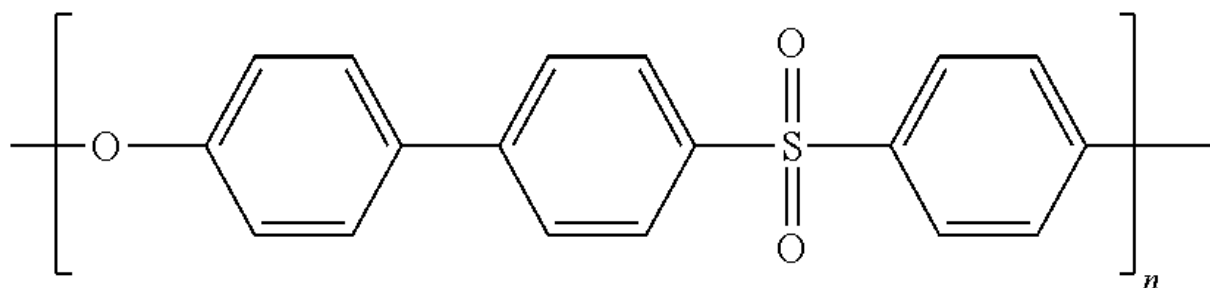


Рис. 2.13. Химическая формула полифенилсульфона

При всех своих достоинствах полифенилсульфон редко используется в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей 370 °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя теоретически печать возможна при использовании керамических сопел. В настоящее время единственным активным пользователем материала является компания Stratasys, предлагающая промышленные установки Fortus.

Полиметилметакрилат (ПММА) – синтетический виниловый полимер метилметакрилата (рис. 2.14), термопластичный прозрачный пластик, широко известный как оргстекло. Полиметилметакрилат прочен, влагоустойчив, безопасен для окружающей среды, легко поддается склеиванию, достаточно пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света. Технические характеристики ПММА представлены в табл. 2.8.

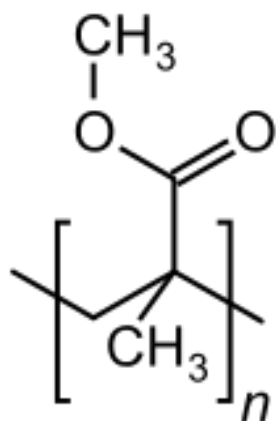


Рис. 2.14. Химическая формула полиметилметакрилата

Таблица 2.8

Характеристики полиметилметакрилата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	400000–500000
Степень кристалличности, %	аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура плавления, °С	160–180
Температура размягчения, °С	95–105
Относительное удлинение при растяжении, %	4–5
Предел прочности при растяжении, МПа	70
Ударная вязкость, кДж/м ²	18–20
Модуль упругости при растяжении, МПа	3000–3500

Полиметилметакрилат плохо подходит для экструзионной 3D-печати в силу ряда причин. ПММА плохо хранится в виде катушек с нитью, так как постоянное механическое напряжение приводит к постепенному разрушению материала. Чтобы избежать образования в печатном изделии пузырьков, разрешение печати должно быть очень высоким. Такое разрешение практически недоступно для домашних принтеров. Быстрое застывание полиметилметакрилата требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати. Показатели скорости печати принтеров экструзионного типа обратно пропорциональны разрешению, что усугубляет проблему. Тем не менее, попытки печати полиметилметакрилатом предпринимаются регулярно. Некоторые из них дают положительные результаты. Однако при создании достаточно прочных моделей избежать образования пузырьков и достигнуть привычной прозрачности материала пока не удастся.

На данный момент наилучшие результаты с полиметилметакрилатом показывает другая технология печати – многоструйное моделирование (MJM) от компании 3D-Systems. В данном случае используется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasys, использующая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear на принтерах марки Objet Eden. Остается надеяться, что высокий спрос на акрил приведет к появлению композитных материалов на основе полиметилметакрилата, предназначенных специально для печати методом послойного наплавления.

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – продукт поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой или её диметиловым эфиром (рис. 2.15). Это твёрдое бесцветное прозрачное вещество в аморфном состоянии и белое непрозрачное в кристаллическом состоянии. Материал используется для производства пластиковых бутылок и другой пищевой и медицинской тары. Полиэтилентерефталат имеет высокую химическую устойчивость к кислотам, щелочам и органическим растворителям. Полиэтилентерефталат (табл. 2.9) обладает высокой износостойкостью и стойкостью к широкому диапазону температур (от -40 °C до +75 °C). Кроме того, ПЭТФ легко поддается механической обработке.

Печать с использованием ПЭТФ несколько проблематична ввиду сравнительно высокой температуры плавления, достигающей 260 °C, и значительной усадки при остывании, составляющей до 2 %. Использование ПЭТФ в качестве расходного материала требует примерно тех же условий, что и печать АБС-пластиком. Для достижения

прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего 70–80 °С.

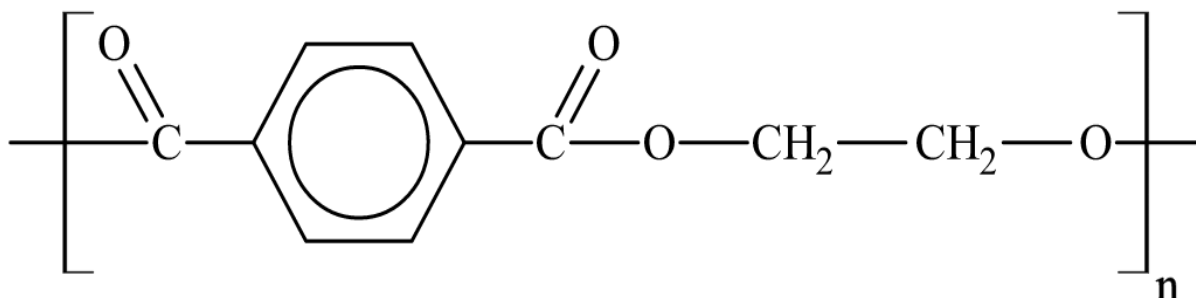


Рис. 2.15. Химическая формула ПЭТФ

Таблица 2.9

Свойства полиэтилентерефталата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	20000–50000
Степень кристалличности, %	2,5–65
Плотность, г/см ³	1,4
Температура размягчения, °С	240
Температура плавления, °С	260
Температура разложения, °С	340
Температура стеклования, °С	70
Морозостойкость, °С	-60
Предел прочности при растяжении, МПа	170
Ударная вязкость, кДж/м ²	9
Модуль упругости при растяжении, МПа	3500

Материал стал предметом внимания умельцев, применяющих использованную тару в качестве сырья для бытового производства расходных материалов для 3D-печати. Для изготовления нитей используются такие перерабатывающие устройства, как FilaBot или RecycleBot.

Полистирол – термопластичный полимер (рис. 2.16), продукт полимеризации стирола (винилбензола). Полистирол обладает линейной структурой. Материал широко используется в промышленности для производства различных бытовых изделий, строительных материалов, одноразовой посуды, игрушек, медицинских инструментов и пр.

При трехмерной печати полистирол демонстрирует физические свойства (табл. 2.10), схожие с АБС-пластиком, что делает этот материал все более популярным среди потребителей.

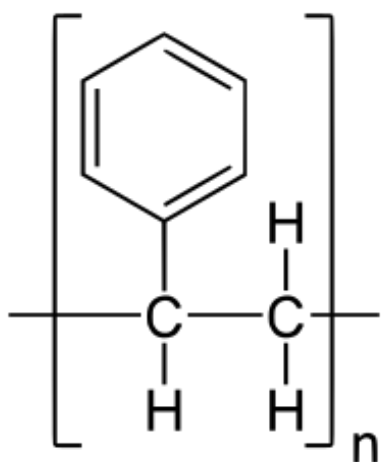


Рис. 2.16. Химическая формула полистирола

Таблица 2.10

Свойства полистирола

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	60000–26000
Степень кристалличности, %	Аморфный
Плотность, г/см ³	1,069–1,125
Теплостойкость по Мартенсу, °С	93
Температура плавления, °С	240
Температура разложения, °С	290
Температура стеклования, °С	93
Твердость по Бринеллю, МПа	140–200
Предел прочности при растяжении, МПа	40–50
Ударная вязкость с надрезом, по Шарпи, кДж/м ²	1,5–2,0
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3,2

Наиболее привлекательной особенностью полистирола являются его специфические химические свойства: полистирол легко поддается растворению в органическом растворителе лимонене. Так как АБС-пластик в лимонене не растворяется, поэтому возможно использование полистирола в качестве материала для построения растворимых поддерживающих структур, что исключительно полезно при построении сложных, переплетенных моделей с внутренними опорами. В сравнении с водорастворимым поливиниловым спиртом полистирол выгодно отличается относительно низкой стоимостью и устойчивостью к влажному климату, затрудняющему работу с ПВС.

Стоит иметь в виду, что некоторые производители филаментов из АБС-пластика используют в своей продукции несколько более дешевый полистирол. Соответственно модели из таких материалов могут раствориться в лимонене вместе с опорными структурами.

При нагревании полистирола до температуры экструзии возможно выделение токсичных испарений, поэтому рекомендуется осуществлять печать в хорошо проветриваемых помещениях.

Древесно-полимерные композиционные материалы (ДПК). Недавняя разработка компании LAYWOO-D3 (рис. 2.17) предназначена для печати моделей, напоминающих деревянные изделия. Материал на 40 % состоит из натуральных древесных опилок микроскопического размера и на 60 % из связующего полимера (полимерной матрицы). В качестве полимерных матриц для LAYWOO-D3 весьма прост в обращении, будучи практически неподверженным деформациям и не требуя использования подогреваемой платформы. Согласно производителям, материал нетоксичен и полностью безопасен.



Рис. 2.17. Филамент LAYWOO-D3

Уникальные свойства материала позволяют добиваться различных визуальных результатов при печати с разными температурами сопла. Диапазон рабочих температур составляет 180 °С–250 °С. По мере увеличения температуры экструзии оттенок материала становится более темным, позволяя имитировать разные сорта древесины или годовые кольца.

Готовые модели (рис. 2.18) прекрасно поддаются механической обработке – шлифовке, сверлению и пр. Кроме того, изделия легко окрашиваются, а неокрашенные модели даже имеют характерный древесный запах.



Рис. 2.18. Модели, полученные из ДПК-филамента

В настоящее время ведутся разработка и тестирование альтернативных материалов, таких, как BambooFill (рис. 2.19), от голландской компании ColorFabb. В состав композита входит примерно 80 мас. % полилактида и 20 мас. % вторичного бамбукового волокна.



Рис. 2.19. Модели, полученные из филамента BambooFill

К сожалению, стоимость древесно-полимерных композитов значительно превышает цену на такие популярные печатные материалы, как полилактид и АБС-пластик. По мере роста популярности древесно-полимерных композиционных материалов в трехмерной печати ожидается снижение их стоимости.

Композиты, имитирующие минералы. Представленный недавно изобретателем Каем Парти композитный материал, представляет собой сочетание полимерной матрицы и минерального наполнителя. Различные комбинации компонентов материалы позволяют производить объекты с различной текстурой поверхности. При низких температурах экструзии порядка 165 °C–190 °C готовые изделия имеют гладкую поверхность. Повышение температуры печати делает материал более шершавым. При температуре экструзии свыше 210 °C материал обретает высокую степень сходства с натуральным песчаником.

Материал легок в работе, не требует подогрева рабочей платформы, не демонстрирует существенных деформаций при усадке и не выделяет токсичных испарений при нагревании. Единственным недостатком материала можно считать его довольно высокую стоимость, что обусловлено малыми масштабами производства.

Композиты, имитирующие металлы. Металлы привлекают сторонников аддитивного производства с самого начала появления технологий 3D-печати. К сожалению, печать чистыми металлами и сплавами вызывает массу трудностей, непреодолимых для большинства методов 3D-печати. Полностью функциональные металлические изделия можно произвести только с помощью таких технологий, как селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание металлов или электронно-лучевая плавка, требующих использования промышленных установок, чья стоимость исчисляется сотнями тысяч долларов. В то же время имитаторы металлов успешно используются в струйной 3D-печати (3DP), где формирование изделий происходит из металлических порошков, частицы которых скрепляются наносимым связующим материалом. В экструзионной печати металлические имитаторы лишь появляются на свет.

Интересным примером служит филамент BronzeFill (рис. 2.20) – фактически, прозрачный полилактид с наполнителем из микрочастиц бронзы. Материал, в настоящее время проходящий бета-тестирование, должен доказать пригодность для использования в любых принтерах, предназначенных для работы с полилактидом.



Рис. 2.20. Модели, полученные из филамента BronzeFill

Готовые изделия легко поддаются полировке, достигая высокого внешнего сходства с цельнометаллическими изделиями. В то же время стоит учитывать, что связующим элементом материала является термопластичный полимер, с соответствующими механическими и температурными ограничениями.

2.3. Стереолитография

Стереолитография (SLA) – технология аддитивного производства изделий из жидких фотополимерных смол. Термин «стереолитография» был придуман в 1986 году Чарльзом В. Халлом, запатентовавшим метод и аппарат для производства твердых физических объектов за счет последовательного наслоения фотополимерного материала. Патент Халла описывал применение ультрафиолетового лазера, проецируемого на поверхность емкости, заполненной жидким фотополимером. Облучение лазером ведет к затвердеванию материала в точках соприкосновения с лучом, что позволяет вычерчивать контуры заданной модели слой за слоем (рис. 2.21).

В 1986 году Халл основал собственную компанию, 3D-Systems, для коммерческого продвижения новой технологии. На сегодняшний день 3D Systems является одним из мировых лидеров среди компаний – разработчиков и поставщиков технологий аддитивного производства, а технология стереолитографии является первой запатентованной и

получившей коммерческое распространение технологией трехмерной печати.

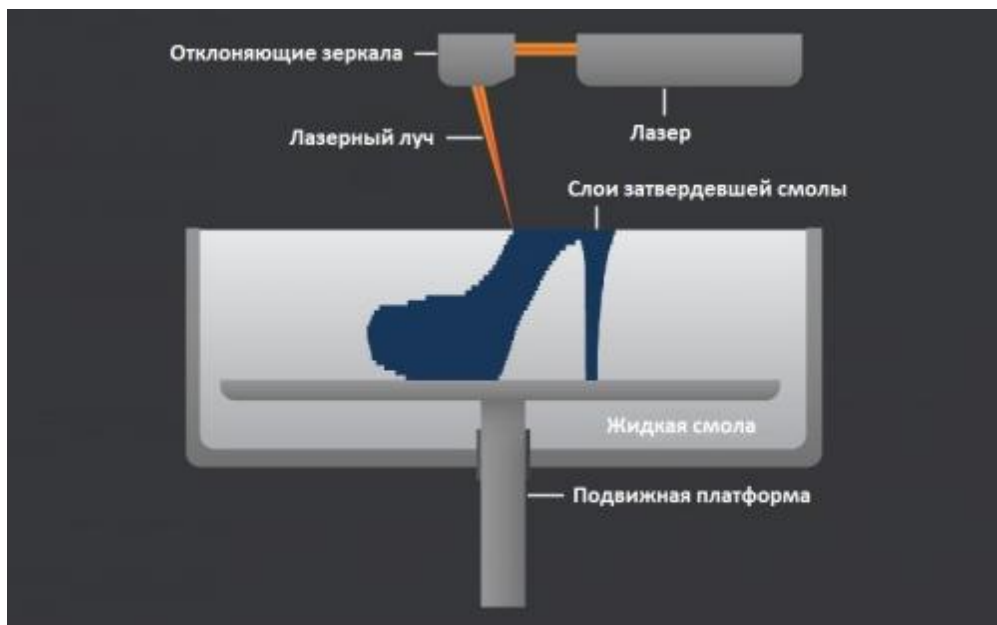


Рис. 2.21. Схема работы принтера по методу стереолитографии

Метод основан на эффекте фотополимеризации (рис. 2.22) различных мономеров и олигомеров под действием излучения. Выделяют два основных вида фотополимеризации: радикальную и ионную.

Радикальная полимеризация – это процесс образования полимера, когда стадии инициирования и роста цепи протекают с участием радикалов. Поскольку одним из основных способов получения свободных радикалов является фотоинициированная диссоциация, то соответственно фотоинициированная полимеризация мономеров и олигомеров, или просто фотополимеризация, является одной из основных разновидностей радикальной полимеризации как в производственных технологиях, так и при проведении научных экспериментов.

Кинетическая схема процесса фотоинициированной радикальной полимеризации выглядит следующим образом. Сначала происходит процесс поглощения света молекулой фотоинициатора. Поглотившая свет молекула переходит в возбужденное состояние и далее идет процесс разрыва химической связи. Разрушается, как правило, самая слабая (либо одна из самых слабых) связь в молекуле. Соединения, используемые как фотоинициаторы, диссоциируют на два радикала или за счет внутримолекулярной перегруппировки образуется бирадикал – молекула, имеющая в разных частях две свободных

валентности. В ряде случаев вместо фотоинициатора используются специальные добавки, фотосенсибилизаторы, которые поглощают свет в данной области спектра. Возбужденный сенсибилизатор либо передает поглощенную энергию инициатору, либо взаимодействует с ним, образуя пару свободных радикалов.

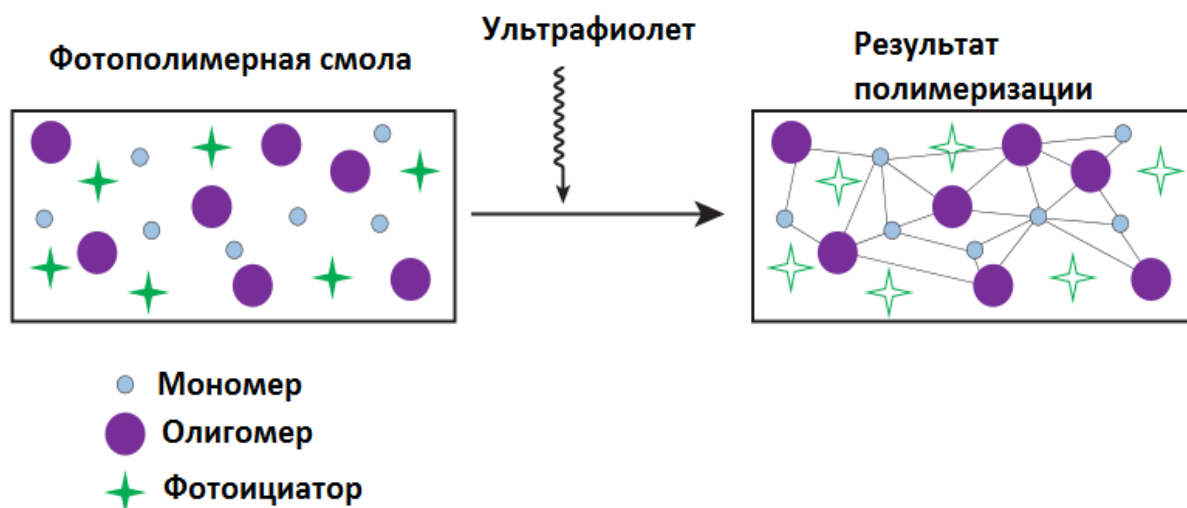


Рис. 2.22. Схема процесса фотополимеризации

Обрыв цепной радикальной реакции происходит либо в случае, когда радикал рекомбинирует с другим радикалом, либо, когда радикал взаимодействует с ингибитором радикальной полимеризации. В последнем случае образуется радикал с очень низкой реакционной способностью. Классическим ингибитором является кислород, проникающий из атмосферы в реакционную смесь, если не проводить процедуру дегазации смеси перед началом процесса. Взаимодействуя с кислородом, активные радикалы создают стабильные и малоактивные перокси-радикалы. Также цепная радикальная реакция полимеризации прекращается, когда радикал оказывается изолированным в матрице полимерной сетки. Однако в этом случае возможна «миграция» свободной валентности по полимерной цепи за счет ряда внутримолекулярных перегруппировок. Но такой процесс протекает не быстро и как правило после завершения облучения.

В зависимости от типа иона выделяют анионную и катионную полимеризации. *Катионная полимеризация* является разновидностью ионной полимеризации, которая подразумевает, что цепная реакция инициируется взаимодействием иона с реакционноспособной группой в мономере или олигомере.

Более исследованными и более широко используемыми фотоинициаторами являются именно катионные инициаторы. Так как при фотодиссоциации известных ионных инициаторов образуется активный катион и малоактивный анион, то под ионной фотополимеризацией подразумевают как правило катионную фотоиницированную полимеризацию. Наиболее широкое применение в 3D-печати находит также именно катионная фотополимеризация. По катионному механизму могут полимеризоваться виниловые и диеновые мономеры и олигомеры, акрилаты и их производные, соединения с гетероциклами. Полимеризация последних протекает с раскрытием цикла в процессе получения полимера.

Кинетическая схема процесса *ионной полимеризации* выглядит следующим образом. Первая стадия – взаимодействие фотоинициатора с УФ излучением. На этой стадии фотоинициатор I под действием поглощенного кванта света образует ионную пару K^+ и A^- . Эта ионная пара может остаться в виде соединения с ионной связью либо продиссоциировать на катион и анион. Обычно один из ионов превосходит другой по реакционной способности и даже, несмотря на потенциальную возможность присутствующего мономера или олигомера, полимеризоваться как по анионному, так и по катионному механизмам, только один ион из пары инициирует цепной процесс. Образовавшийся катион взаимодействует со следующей молекулой мономера или олигомера.

Обрыв цепи рекомбинацией полимерного катиона с анионом происходит очень редко. Как правило, обрыв цепи происходит либо передачей цепи на мономер с отщеплением атома водорода и образованием малоактивного катиона, либо цепная реакция прекращается тогда, когда полимерная молекула теряет подвижность и катион оказывается пространственно изолированным в окружающей полимерной матрице. Для соединений, имеющих в своей структуре гетероциклы, уравнение реакции инициирования цепи и раскрытия цикла выглядит следующим образом: образовавшийся катион взаимодействует с другой молекулой мономера, что также приводит к раскрытию цикла.

Построение модели методом стереолитографии проводится слой за слоем. Каждый слой вычерчивается лазером согласно данным, заложенным в трехмерной цифровой модели. Облучение лазером приводит к полимеризации (т.е. отверждению) материала в точках соприкосновения с лучом. Для наглядности этот процесс можно сравнить с отверждением эпоксидной смолы (олигомера) под действием отвер-

дителя (реагента). В обычном состоянии она жидкая, но, вступая в реакцию, ее молекулы соединяются и застывают, превращаясь в твердый полимер.

По завершении построения контура рабочая платформа погружается в бак с жидкой смолой на дистанцию, равную толщине одного слоя, – как правило, от 0,05 мм до 0,15 мм. После выравнивания поверхности жидкого материала начинается процесс построения следующего слоя. Цикл повторяется до построения полной модели. После завершения постройки изделия промываются для удаления остаточного материала и при необходимости подвергаются обработке в ультрафиолетовой печи до полного затвердевания фотополимера.

Стереолитография требует использования поддерживающих структур для построения навесных элементов модели, аналогично технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM). Опоры предусматриваются в файле, содержащем цифровую модель, и выполняются из того же фотополимерного материала. По сути, опоры являются временными элементами конструкции, удаляемыми вручную после завершения процесса изготовления.

Главным преимуществом стереолитографии можно считать высокую точность печати. Существующая технология позволяет наносить слои толщиной 15 микрон, что в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Точность изготовления достаточно высока для применения в производстве прототипов стоматологических протезов и ювелирных изделий.

Скорость печати относительно высока, если учитывать высокое разрешение подобных устройств: время построения одной модели может составлять лишь нескольких часов, но в итоге зависит от размера модели и количества лазерных головок, используемых устройством одновременно. Относительно небольшие настольные устройства могут иметь область построения от 50 до 150 мм в одном измерении. В то же время существуют промышленные установки, способные печатать крупногабаритные модели, где изделия измеряются уже в метрах. Готовые изделия могут обладать различными механическими свойствами в зависимости от заложенных характеристик фотополимера: существуют имитаторы твердых термопластичных полимеров, резины и других материалов.

В качестве расходных материалов в стереолитографии используются композиционные материалы на основе полифункциональных акриловых и метакриловых смол, а также неорганических наполнителей,

обеспечивающих снижение величины усадки. В стереолитографии достаточно популярны и смеси эпоксидных смол с катионными фотоинициаторами.

Стоит отметить, что фотополимерные смолы могут иметь самые разные физические характеристики: некоторые виды могут напоминать АБС-пластик, а некоторые – иметь эластичность на уровне резины. Доступны различные цвета и смолы с различной прозрачностью в полимеризованном состоянии. Разные смолы имеют разные показатели токсичности. Некоторые смолы могут быть совместимы с различными принтерами, а некоторые «заточены» под конкретные системы. Все эти факторы определяют выбор печатного оборудования.

Хранение фотополимерных смол требует особого внимания. Дело в том, что длина волны излучения, которым может быть осуществлена засветка, варьируется от материала к материалу и не всегда указывается производителями. При обращении с фотополимерными смолами необходимо принимать основные меры предосторожности, использовать защитные очки и перчатки. Хотя сами смолы могут быть нетоксичны, зачастую требуется промывка готовых моделей растворителями, которые представляют опасность здоровью.

Стереолитография позволяет создавать детали высокой сложности, но зачастую имеет высокую стоимость за счет относительно высокой цены расходных материалов. Один литр фотополимерной смолы может стоить от 80 до 120 долларов, в то время как стоимость устройств может варьироваться от 10000 до 500 000 долларов. Высокая популярность технологии способствует разработке более доступных моделей, таких, как FORM 1 от компании Form1 АБС или Pegasus Touch от компании FSL3D с заявленной стоимостью в 2400 и 3500 долларов соответственно.

В 2011 году в Венском Технологическом Университете был представлен компактный и относительно недорогой 3D-принтер, работающий по технологии стереолитографии. Масса представленного принтера составила 1,5 кг, а стоимость примерно 1200 евро.

Одно из преимуществ 3D-печати методом стереолитографии – скорость. Объекты возводятся в течение дня, хотя отдельные модели с особо сложной геометрией могут выращиваться до нескольких дней. Большинство аппаратов для стереолитографии работают с объектами, не превышающими 50x50x60 см, однако существуют исключения.

2.4. Технология многоструйного моделирования

Технология многоструйного моделирования (*MJM*) – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией 3D Systems. Технология используется в линейке профессиональных принтеров ProJet.

Технология многоструйного моделирования сочетает черты таких методов 3D-печати, как струйная трехмерная печать (3DP), моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF) и стереолитография (SLA). Построение слоев проводится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопел. Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

Печать проводится термопластичными полимерами, восками и фотополимерными смолами. В первых двух случаях материалы затвердевают за счет постепенного охлаждения. В случае печати фотополимерами каждый нанесенный слой обрабатывается ультрафиолетовым излучателем для полимеризации (затвердевания).

Многоструйное моделирование позволяет создавать опоры нависающих элементов моделей из относительно легкоплавкого воска. В случае использования вспомогательных восковых структур по окончании печати готовая модель помещается в печь (встроенную или отдельную) и нагревается до температуры примерно 60 °С для выплавки воска.

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750x750x1600 DPI. Ранние модели MJM-принтеров использовали обыденные термопластичные полимеры. Развитие и совершенствование фотополимерных материалов привели к постепенной замене термопластичных полимеров фотополимерными смолами и восками.

Принтеры ProJet используют ассортимент материалов марки VisiJet, включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами. Так, VisiJet DentCast используется в качестве отливочного воска в стоматологии, VisiJet X служит в качестве альтернативы популярному АБС-пластику, VisiJet Crystal применяется для создания высокоточных литейных мастер-моделей и т.д.

Технология MJM используется в различных отраслях, требующих создания высокоточных прототипов и готовых изделий (рис. 2.23). Среди областей применения можно назвать стоматологию, ювелирное

дело, промышленный и архитектурный дизайн, разработку электронных компонентов и пр.



Рис. 2.23. Изделия, полученные с помощью технологии многослойного моделирования

2.5. Цифровая светодиодная проекция

Цифровая светодиодная проекция (DLP) – метод аддитивного производства, родственник стереолитографической 3D-печати.

Метод использует цифровые светодиодные проекторы (DLP), позволяя снижать себестоимость устройств. В отличие от лазерных установок, сканирующих поверхность материала одним или несколькими лазерными головками, DLP-принтеры проецируют изображение целого слоя до затвердевания полимерной смолы, после чего наносится новый слой материала и проецируется изображение нового слоя цифровой модели.

О преимуществах того или иного метода сложно судить. Метод цифровой светодиодной печати появился не так давно, но уже демонстрирует прекрасные результаты, сопоставимые по точности и производительности с оригинальной технологией лазерной стереолитографии, запатентованной Чарльзом Халлом в 1986 году и давшей первый существенный толчок развитию трёхмерной печати. Основным пре-

имуществом DLP перед стереолитографией может стать более низкая стоимость используемых проекторов по сравнению с лазерными излучателями.

С момента своего появления DLP-принтеры составляют прямую конкуренцию устройствам, работающим по технологии стереолитографии. DLP-принтеры применяются в стоматологии, ювелирной промышленности, свободном дизайне и в производстве сувениров.

Как и стандартные стереолитографические устройства, DLP-принтеры имеют высокие показатели точности печати – минимальная толщина слоя может достигать 15 микрон с использованием существующих установок. Минимальная толщина слоя, наносимого более доступными экструзионными принтерами, как правило, составляет не менее 50 микрон. С другой стороны, разрешение обратно пропорционально скорости нанесения слоев материала. Таким образом, технология позволяет достигать более высоких показателей точности ценой снижения скорости печати. Расходные материалы, а именно фотополимерные смолы, имеют высокий диапазон механических характеристик: возможны имитаторы в диапазоне от твердых пластиков до резины. Как правило, печать осуществляется материалом одного цвета, но ограничений палитры не существует.

Основным недостатком метода DLP, как и стереолитографии, является относительно высокая стоимость расходных материалов – порядка \$ 80–160 за один литр жидкого полимера. Для сравнения: килограмм пластиковой нити для печати методом послойного наплавления можно приобрести за \$ 35. В итоге, пользователь должен найти правильный баланс между качеством и себестоимостью печати.

К достоинствам DLP-принтеров можно отнести высокие точность и скорость печати. Технология цифрового проецирования в целом очень эффективна, о чем говорит ее применение во многих сферах. Всегда важно обращать внимание на перспективность, а 3D-печать еще не раскрыла всех своих возможностей. Еще одним плюсом устройств для печати методом цифровой светодиодной проекции является их более низкая стоимость по сравнению с другими трехмерными принтерами.

К недостаткам можно отнести недостаточную безопасность используемых материалов. Существуют достаточно токсичные полимерные смолы. А еще они достаточно дороги. Но результаты вполне окупают эти недостатки.

2.6. Масочная стереолитография

Масочная стереолитография (SGC) – метод аддитивного производства, во многом схожий с технологией печати методом цифровой светодиодной проекции (DLP). Технология была разработана и внедрена на рынок израильской компанией Cubital Ltd в 1986 году. Компания Cubital закончила свое существование, но интеллектуальные права были сохранены компанией Objet Geometries Ltd, а в 2012 году перешли к корпорации Stratsasys в результате слияния двух компаний. В связи с этим вариант технологии SGC, используемый на принтерах конкурирующей компании 3D-Systems, известен под названием Film Transfer Imaging (FTI).

Технология основана на нанесении тонких слоев фотополимерной смолы с последующим облучением материала ультрафиолетовым светом. Облучение происходит по физическому фотошаблону, или «маске» соответствующего контура. Облучение приводит к полимеризации (затвердеванию) материала, после чего лишний материал удаляется из рабочей зоны, а полости заполняются легкоплавким воском. При необходимости проводится механическая обработка поверхности, после чего производственный цикл повторяется. По завершении построения модели воск выплавляется, оставляя готовую модель, не требующую дополнительного облучения в ультрафиолетовой печи для полной полимеризации.

В качестве расходных материалов используются фотополимерные смолы. Подбор подходящего материала может потребовать определенного внимания ввиду технологических особенностей производства – при необходимости механической обработки полимер должен обладать соответствующими характеристиками. Как правило, используются фотополимеры, напоминающие по прочности и вязкости АБС-пластик.

Основным преимуществом SGC является отсутствие необходимости в построении поддерживающих структур, как в случае с такими стереолитографическими методами, как SLA или DLP. В дополнение к высокому разрешению по горизонтали механическая обработка каждого наносимого слоя позволяет добиваться высокой точности по оси Z. Наконец, технология отличается достаточно высокой производительностью за счет одновременного облучения целых слоев. Среди недостатков следует отметить относительно высокую шумность и большое количество отходов, повышающее себестоимость печати. Сами же установки довольно дороги ввиду сложности конструкции.

В последнее время метод SGC почти не используется, а его вариация FTI стала практически неотличима от цифровой светодиодной печати (DLP) ввиду внедрения цифровых проекторов.

2.7. Ламинирование

Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) – технология быстрого прототипирования, разработанная компанией Helisys Inc. Метод подразумевает последовательное склеивание листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки. Объекты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.

Процесс печати протекает следующим образом (рис. 2.24): Лист материала с клейким покрытием наносится на рабочую платформу (или нижние слои модели) с помощью разогретого ролика. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры удаления. Платформа с готовым слоем передвигается вниз. В рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом. Цикл повторяется до завершения постройки модели, после чего лишний материал удаляется, и проводится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.)

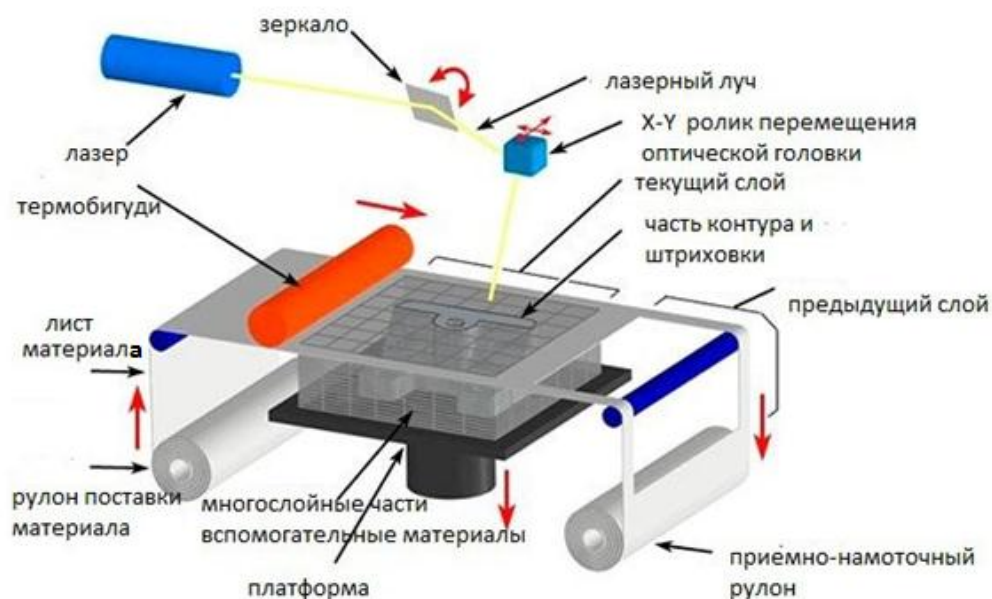


Рис. 2.24. Схема процесса ламинирования

После того как печать завершена, объект снимается с платформы и лишняя часть материала удаляется. Изделия, для печати которых использовалась бумага, после завершения процесса по структуре напоминают дерево и могут быть соответствующим образом (с помощью инструментов для столярных работ) обработаны. Зачастую их покрывают лаком для защиты от влаги.

Компания Mcor Technologies использует вариант технологии, получивший название *«выборочное ламинирование»*, или *SDL*. Этот метод предусматривает нанесения клея только в местах, входящих в состав расчетной модели, что облегчает процесс удаления лишнего материала. В отличие от стандартной технологии на основе лазерной резки, выборочное ламинирование использует механическую резку с помощью лезвия из карбида вольфрама. Это позволяет несколько снизить стоимость устройств.

Домашние 3D-принтеры, работающие по технологии ламинирования, – большая редкость. Существует принтер SD300 от компании Cubic Techonogies, который можно использовать в домашних условиях, но его стоимость составляет около 15 тысяч долларов.

В качестве расходных материалов в трехмерной печати методом ламинирования применяются различные типы бумаги, картона, пластика, текстильных материалов и фольги. Обязательным условием качественной печати является учет адгезионных свойств используемых расходных материалов.

По точности изготовления ламинирование уступает аналогам, однако имеет и некоторые достоинства. Например, материалы, используемые для печати в процессе ламинирования, являются достаточно недорогими, прочными, доступными, а их свойства хорошо изучены.

С другой стороны, этот метод не подходит для создания объектов со сложной структурой, а также не позволяет создавать изделия, полые внутри. Из-за не слишком высокой точности его нельзя использовать для создания функциональных прототипов. Подходящие для печати с использованием ламинирования объекты – это, в первую очередь, масштабные модели и прототипы для оценки формы и внешнего вида изделия. Также с его помощью можно изготавливать образцы для использования в промышленности (отливке металла и т.д.).

Особенностью метода является низкая себестоимость благодаря общедоступности расходных материалов. Бумажные модели приближаются по физическим характеристикам к древесине, что позволяет проводить соответствующую механическую обработку. Разрешение

печати несколько уступает таким высокоточным методам, как стереолитография (SLA) или выборочное лазерное спекание (SLS). Технология ламинирования допускает производство достаточно крупногабаритных моделей.

2.8. Ламинирование методом селективного осаждения

Ламинирование методом селективного осаждения (SDL) или 3D-печать на бумаге было изобретено докторами Конором и Финтаной Маккормак в 2003 году.

Технологию ламинирования методом селективного осаждения не стоит путать с более старой технологией изготовления объектов с использованием ламинирования (LOM).

В технологии LOM использовали лазер, ламинированную бумагу и клей так, что все склеивалось между собой, в том числе и поддерживающие структуры вокруг 3D-модели. Извлечение модели могло стать настоящим испытанием, зачастую приводящим к поломке изделия. В технологии компании Mscor используются лезвия для резки, а принтер склеивает только те части модели, которые склеить необходимо (рис 2.25). Первый лист вручную прикрепляется к сборочной пластине. Расположить первый лист правильно не самое важное, так как первые несколько страниц соединяются вместе в качестве базового слоя, перед тем как начинается процесс нарезки.

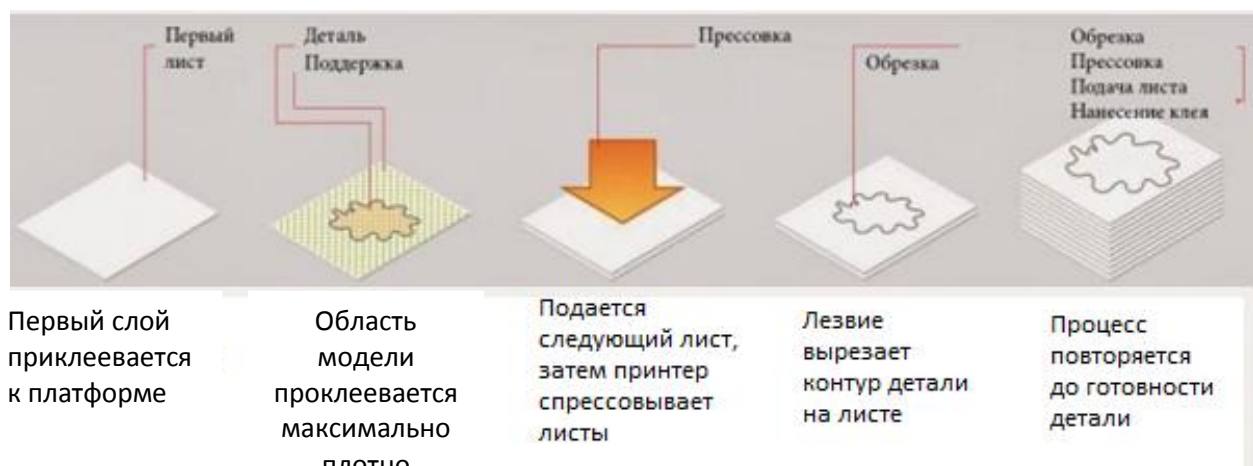


Рис. 2.25. Схема процесса ламинирования методом селективного осаждения

После того как показатели измерения глубины лезвия и клеящего слоя выверены, двери принтера закрываются – аппарат готов к импорту данных от программы-слайсера. Вначале слой клея наносится на верхнюю часть листа, помещенного на сборочную пластину. Клей наносится выборочно; именно поэтому метод печати получил название "*селективный*". Иными словами, клеящий материал более высокой плотности будет нанесен на те области, которые впоследствии станут частью модели, а клеящее средство меньшей плотности будет нанесено на те части, которые будут служить ее поддержкой.

Новый лист бумаги подается в принтер из лотка для бумаги и направляется ровно на то место, куда было нанесено клеящее средство. Сборочная пластина перемещается вверх к раскаленной пластине, после чего к составным частям применяется давление. За счет этого давления достигается прочная связь между двумя листами бумаги.

Когда сборочная пластина возвращается на свое первоначальное положение, регулируемое лезвие из карбида вольфрама разрезает лист бумаги и в то же время следит за контуром объекта для создания формы будущей модели. После того как вся эта последовательность выполнена, устройство начинает наносить следующий слой клея. Весь процесс продолжается до момента, пока все листы не будут разрезаны и склеены между собой, а модель не примет свой окончательный вид. После того как нанесение последнего слоя завершено, модель может быть извлечена из сборочной камеры.

Главное преимущество ламинирования методом селективного осаждения становится очевидным, когда вы избавляетесь от ненужных, поддерживающих модель частей. Этот процесс называется "извлечение". В связи с тем, что клеящее вещество наносится выборочно, между составными частями модели связь более прочная, чем между поддерживающими материалами. Кроме того, для облегчения процесса извлечения модели поддерживающий материал "разваливается" на маленькие составные части, похожие на игральные кости; это предотвращает разрушение хрупкой 3D-модели.

Принтеры Mscor отличаются своей неприхотливостью: для извлечения 3D-моделей из-под поддерживающей структуры погружать детали в токсичные химические вещества или использовать острые инструменты вовсе не обязательно. При печати на принтере компании Mscor модель не раскрошится и не разрушится. На выходе 3D-модель представляет собой прочную и жесткую структуру. Так как модель создается путем плотного сжатия листов бумаги, конечный продукт –

это, практически, воссозданное дерево. Модель генерирует тепло, вызывает приятные тактильные ощущения.

Модель можно будет обработать любым желаемым способом для того, чтобы она отвечала всем необходимым требованиям.

2.9. Струйная трехмерная печать

Струйная трехмерная печать (3DP) – один из старейших методов аддитивного производства. Эта технология была разработана в Массачусетском Технологическом институте (MIT) в 1993 году. Технология получила коммерческое распространение в 1995 году с помощью компании Z Corporation, приобретенной корпорацией 3D-Systems в 2012 году.

Как и другие технологии аддитивного производства, струйная трехмерная печать подразумевает послойное построение физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. В качестве расходных материалов используются различные порошки, гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси, наносимые последовательными тонкими слоями. Контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал. Таким образом частицы каждого нового слоя склеиваются между собой и с предыдущими слоями до образования готовой трехмерной модели (рис. 2.26).

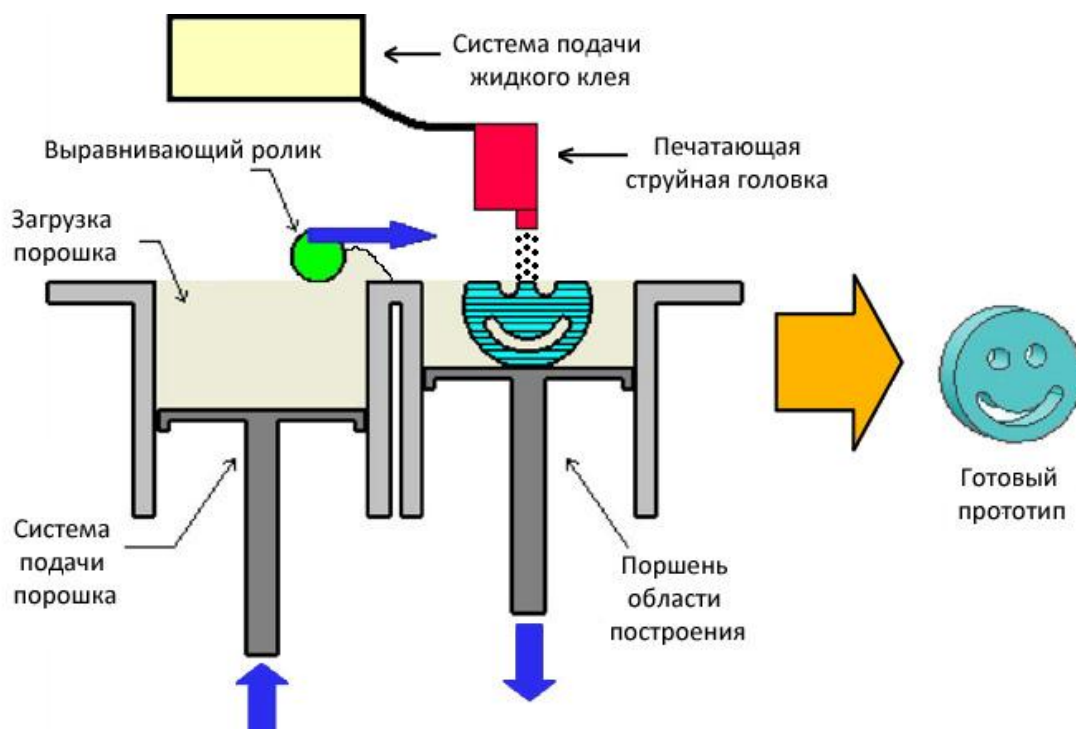


Рис. 2.26. Схема процесса струйной трехмерной печати

Оригинальные устройства использовали в качестве расходного материала гипс, что обусловило обиходное название технологии – *«гипсовая трехмерная печать»*. Печатные головки экструдируют воду, склеивающую материал. Со временем технология прогрессировала и теперь включает возможность добавки различных агентов: красителей, уплотнителей и пр.

В настоящее время помимо гипса используются различные материалы, включая пластики, песчаные смеси и даже металлы. Технология способна создавать трехмерные модели из любого порошкового материала, а добавление красителей в связующий материал позволяет осуществлять цветную печать.

Практичность же моделей зависит от последующей обработки. Например, изделия, созданные из металлического порошка, будут обладать видом, схожим с необработанными металлическими изделиями. С другой стороны, их прочность будет напрямую зависеть от связующего материала и, как правило, будет невысока. Для улучшения механических свойств можно прибегнуть к обжигу с помощью гончарных печей. Во избежание деформации моделей обжиг, как правило, подразумевает не спекание, а выплавку изначального связующего материала с пропиткой более твердой субстанцией. Например, возможна выплавка или выжигание связующих пластиков с одновременной пропиткой стальной модели медью или бронзой.

Готовые изделия будут обладать высокой долговечностью, но их механические характеристики все равно не будут достаточными для применения в качестве функциональных прототипов деталей механизмов. Как правило, модели, изготовленные по технологии 3DP, используются в качестве сувениров, украшений или макетов, любых моделей высокой геометрической сложности, не подверженных высоким механическим нагрузкам.

Наряду с высокой универсальностью в плане используемых материалов, метод 3DP отличается отсутствием необходимости печати опорных структур. Такие популярные методы, как FDM или SLA, требуют постройки дополнительных элементов, называемых «опорами» или «поддержками», для стабилизации навесных элементов печатаемых моделей. В противном случае существует реальная возможность провисания слоев и деформации моделей, а в крайних случаях печать вообще невозможна ввиду отсутствия необходимой опорной поверхности. В случае с 3DP необходимость создания опорных структур отпадает, так как каждый слой порошка служит естественной опорой для следующего слоя. Стоит отметить и экономичность

технологии: остаточный порошок может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован в следующем производственном цикле.

Технология 3DP пользуется широкой популярностью и применяется в самых различных отраслях, зачастую теряя свое оригинальное обозначение. Так, в сфере биопечати используется вариант технологии, известный как «*капельная/струйная печать*», или *DOD* (Drop on Demand). Этот метод применяется для послойного нанесения живых клеток с целью построения органических тканей. Одним из наиболее ярких примеров использования технологии 3DP стало создание кондитерских принтеров Chef Jet, строящих трехмерные съедобные модели из сахаросодержащих продуктов, склеивая частицы материала водой, наподобие оригинальных «гипсовых» принтеров.

2.10. Электронно-лучевая плавка (проволочная)

Изготовление произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF) – новаторский метод аддитивного производства, разработанный Исследовательским центром NASA в Лэнгли (LaRC) под руководством Карен Тамингер. Технология EBF нацелена на аддитивное производство комплексных моделей с пониженным по сравнению с традиционными методами расходом материалов и практическим отсутствием необходимости механической обработки. Разработка технологии ведется на протяжении более чем десятилетия в сотрудничестве с другими исследовательскими центрами NASA (JSC, GRC, GSFC и MSFC), федеральными агентствами и частной аэрокосмической промышленностью США. NASA надеется использовать EBF для производства металлических частей в условиях отсутствия гравитации. Метод использует электронные пучки высокой мощности для последовательного наплавления материалов в форме металлической проволоки. Технологические особенности электронно-лучевой плавки, наряду с экологичностью и эффективностью, делают процесс привлекательным для использования в космосе.

Концепция EBF основана на постройке «практически готовых форм» (Near-net-shape в англоязычной терминологии). Это означает, что изделия создаются на основе трехмерных цифровых моделей с настолько высокой точностью, что механическая обработка и доводка изделий практически не требуются. Современные производственные методы с использованием программного управления основываются на

обработке трехмерной цифровой модели для создания алгоритмов, используемых в машинной обработке (т.н. G-code). Алгоритмы служат для определения траектории движения режущих инструментов в процессе создания готового изделия из болванки.

В случае с EBF процесс имеет прямо противоположное направление: те же самые цифровые модели используются для выработки производственных алгоритмов, регулирующих не удаление лишней массы, а нанесение необходимого материала.

Технология использует электронные излучатели высокой мощности в вакуумной камере для плавки металла. Электронный пучок передвигается по рабочей поверхности, повторяя контуры цифровой модели, в то время как металлическая проволока постепенно подается в точку фокусирования пучка. Расплавленный материал немедленно застывает, формируя прочные слои заданной модели. Процесс повторяется до построения цельной модели, требующей лишь минимальной обработки внешней поверхности.

Технология EBF позволяет создавать объекты размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Практические ограничения по объему построения накладываются физическими размерами вакуумной рабочей камеры и количеством доступного расходного материала. В качестве расходных материалов могут применяться практически любые металлические сплавы.

2.11. Прямое лазерное спекание металлов

Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) – технология аддитивного производства металлических изделий, разработанная компанией EOS из Мюнхена. Технология DMLS зачастую путают со схожими технологиями выборочного лазерного спекания (Selective Laser Sintering, или SLS) и выборочной лазерной плавки (Selective Laser Melting, или SLM).

Процесс печати включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством. Готовый «построечный» файл используется как набор чертежей во время печати. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности –

порядка 200 Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Как вариант возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения вычерчивания слоя процесс повторяется: валик подает свежий материал и лазер начинает спекать следующий слой (рис. 2.27). Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон. Для сравнения: типичная толщина слоя в любительских и бытовых принтерах, использующих технологию послойного наплавления, составляет порядка 100 микрон.

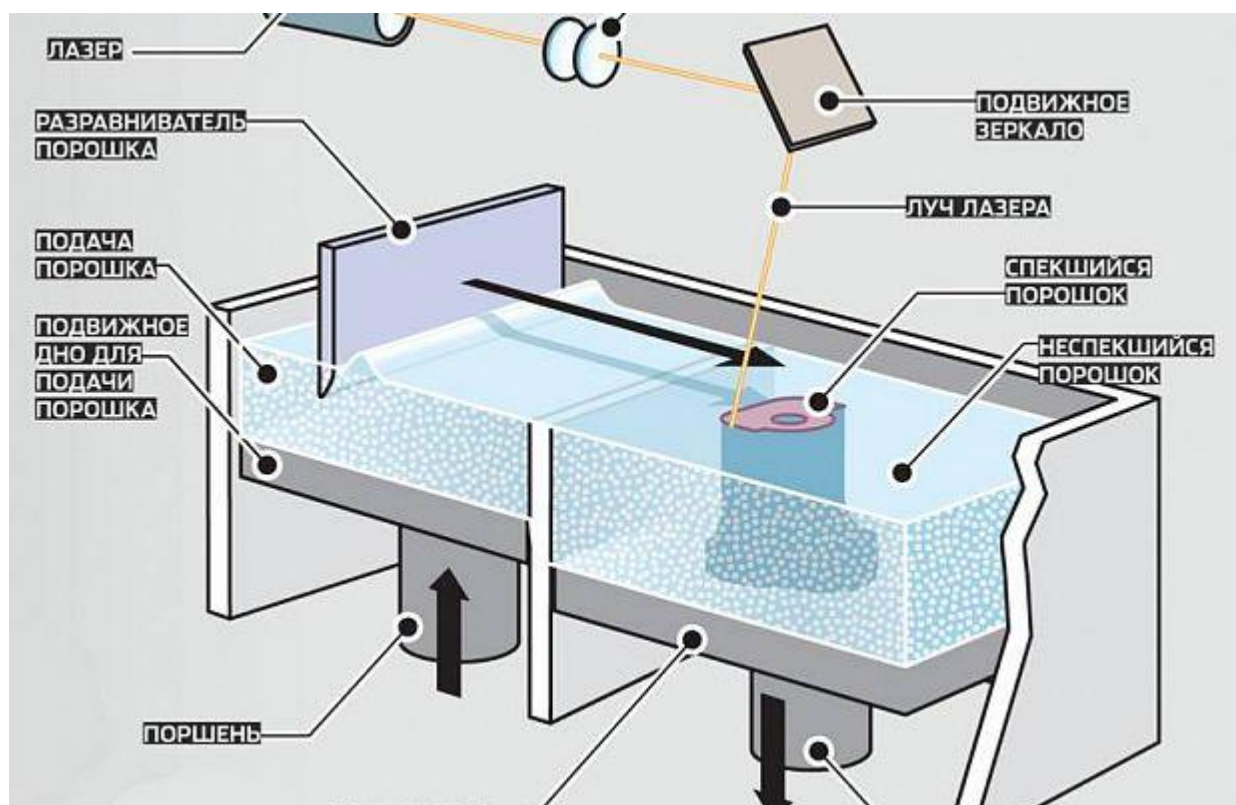


Рис. 2.27. Схема процесса прямого лазерного спекания

Другой интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для нависающих элементов конструкции. Неспечённый порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. Производство методом прямого лазерного спекания можно считать фактически безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов, например драгоценных металлов.

Одним из важных условий при лазерной печати является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка. Для выполнения этого условия используют аргон или азот. Однако применение азота как инертного газа несколько ограничено из-за возможности образования нитридов (например, нитридов алюминия или титана при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к понижению пластичности материала.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Технология прямого лазерного спекания обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными методами производства. Наиболее очевидным ее достоинством является возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки («субтрактивных» методов – фрезеровки, сверления и пр.). Производство практически безотходно, что выгодно отличает прямое лазерное спекание от субтрактивных технологий. Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно с ограничением лишь по размеру рабочей камеры. Построение моделей занимает примерно несколько часов, что несоизмеримо выгоднее, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла. С другой стороны, детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы или детали, произведенные субтрактивными методами.

Прямое лазерное спекание активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали со сложной геометрией могут быть выполнены цели-

ком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Так как прямое лазерное спекание не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не предполагает образования большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии значительно выгодней, чем традиционными методами.

Технология прямого лазерного спекания применяется для производства готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую и другие (рис. 2.28). Типичный размер области построения существующих установок составляет 250x250x250 мм, хотя технологических ограничений размеров не существует – это лишь вопрос стоимости устройства. Прямое лазерное спекание используется для быстрого прототипирования, что сокращая время разработки новых продуктов, а также в производстве, что позволяет уменьшать себестоимость мелких партий и упрощать сборку изделий сложной геометрической формы.



Рис. 2.28. Изделия, полученные по технологии прямого лазерного спекания

Северо-западный политехнический университет Китая использует DMLS-системы для производства элементов конструкции самолетов. Исследования, проведенные EADS, также указывают на уменьшение себестоимости и отходов при использовании технологии

DMLS для производства сложных конструкций в единичных экземплярах или мелкими партиями. 5 сентября 2013 года Илон Маск опубликовал фотографии детали ракетного двигателя Super Draco, созданной из никель-хромового жаропрочного сплава Inconel с помощью принтера EOS.

В качестве расходных материалов могут использоваться практически любые металлы и сплавы в порошковой форме. На сегодняшний день успешно применяется нержавеющая сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан и прочие материалы.

2.12. Непрямое лазерное спекание металлов

Процесс, получивший название не прямое лазерное спекание металлов (IMLS), был разработан компанией DTMcorp of Austin в 1995 году. С 2001 года DTMcorp принадлежит компании 3D-Systems. В процессе непрямого лазерного спекания используют смесь порошка и полимера или порошок, покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводятся отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом-связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для непрямого лазерного спекания можно использовать порошки как металлов, так и керамики или их смесей. Приготовление смеси порошка с полимером проводят механическим смешиванием, при этом содержание полимера составляет около 2–3 % (по массе), а в случае использования порошка, покрытого полимером, толщина слоя на поверхности частицы составляет около 5 мкм. В качестве связки используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры. Температура отгонки полимера определяется температурой его плавления и разложения и в среднем составляет 400–650 °С. После отгонки полимера пористость изделия перед пропиткой составляет около 40 %.

При пропитке печь нагревают на 100–200 °С выше точки плавления пропитываемого материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки.

Обычно пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия, которая играет роль поддерживающего каркаса,

поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Защиту от окисления организуют с помощью создания в печи инертной или восстановительной среды.

Для пропитки можно использовать довольно разнообразные металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям. Материал для пропитки должен характеризоваться незначительным межфазным взаимодействием, или его полным отсутствием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Например, в случае если компоненты взаимодействуют между собой, то в процессе пропитки могут происходить нежелательные процессы, такие, как образование более тугоплавких соединений или твердых растворов, что может привести к остановке процесса пропитки или негативно сказаться на свойствах и размерах изделия. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу, при этом усадка изделия составляет 2–5 %.

2.13. Электронно-лучевая плавка металлов

Электронно-лучевая плавка (electron beam melting, или EBM) – метод аддитивного производства металлических изделий. Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM). Главное отличие заключается в использовании электронных излучателей (т.н. электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии для плавки. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавки металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели (рис.2.29). В отличие от технологий спекания электронно-лучевая плавка позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности.

Этот метод производства деталей произвольных форм позволяет создавать металлические модели высокой плотности из металлического порошка. Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные с файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контуры слоев модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах

соприкосновения. Плавка проводится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с материалами, чувствительными к окисдации, например с чистым титаном.

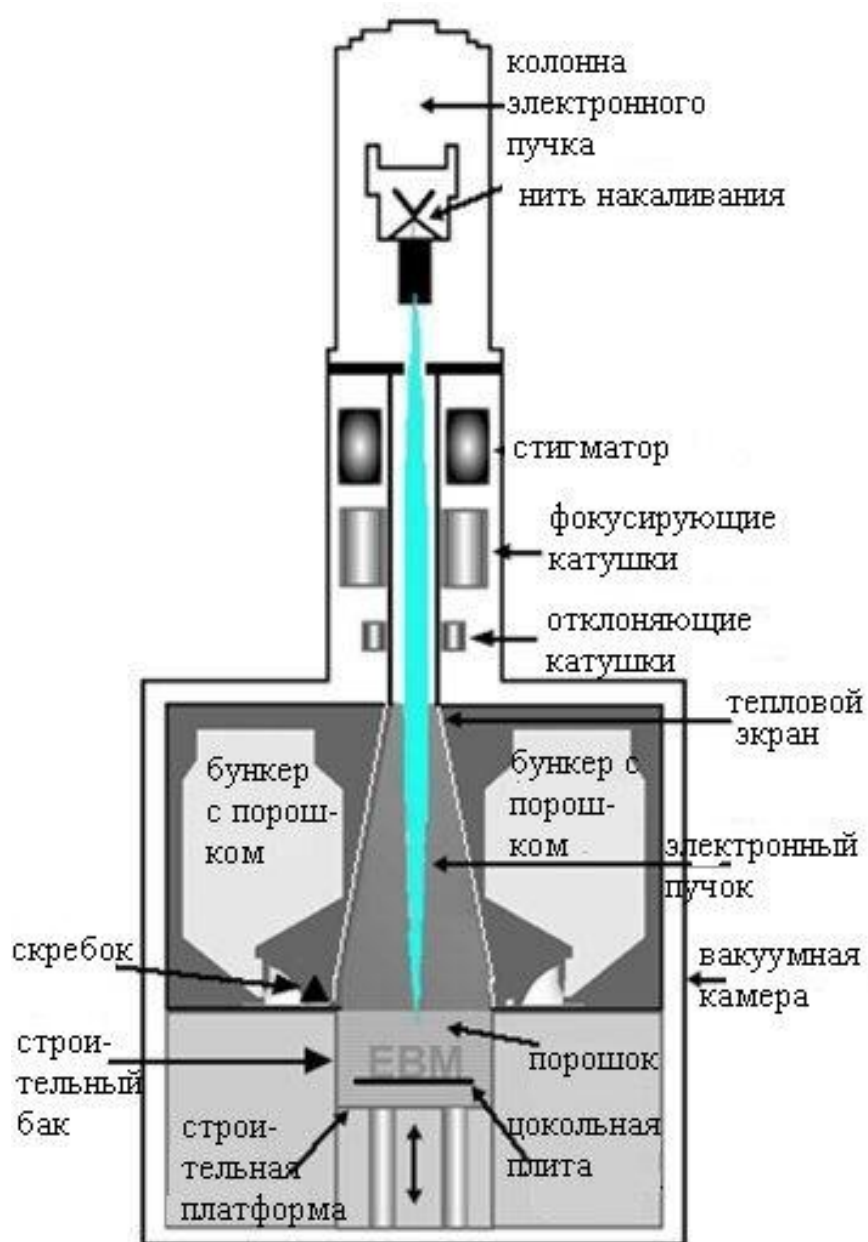


Рис. 2.29. Схема процесса электронно-лучевой плавки

Расходные материалы состоят из чистого металлического порошка без связующего полимера, а готовые модели не отличаются пористостью. Таким образом, не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности. Этот аспект позволяет классифицировать электронно-лучевую плавку в

одну группу с выборочной лазерной плавкой (SLM) и противопоставить технологиям выборочного лазерного спекания (SLS) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS), зачастую требующим обжига после печати для достижения максимальных прочностных характеристик. В сравнении с методами SLS, SLM и DMLS электронно-лучевая плавка характеризуется более высокой скоростью построения за счет более высокой мощности излучателей и электронного, а не электро-механического отклонения пучков.

Электронно-лучевая плавка проводится при повышенных фоновых температурах, достигающих 700–1000 °С, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига. Технология была разработана и впервые применена шведской компанией Arcam AB.

Использование в качестве расходных материалов титановых сплавов позволяет применять технологию EBM для производства медицинских имплантатов. Начиная с 2007 года две европейские компании, Adler Ortho и Lima Corporate, а также американская компания Ecastech используют технологию электронно-лучевой плавки для производства ацетабулярных чашек (имплантатов тазобедренного сустава).

Технология получила применение в аэрокосмической отрасли: Boeing, Lockheed Martin и NASA используют технологию электронно-лучевой плавки для производства деталей реактивных и ракетных двигателей, а также несущих элементов конструкции летательных аппаратов.

2.14. Селективное лазерное плавление

Селективное (выборочное) лазерное плавление (SLM) – метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков.

Разработка технологии селективного лазерного спекания велась В. Майнерсом и К. Виссенбахом из Института лазерной техники (ILT) Общества Фраунгофера (г. Ахен) совместно с Д. Шварце и М. Фокеле из компании F&S Stereolithographie-technik GmbH (г. Падерборн).

В 2000 году компания F&S заключила коммерческое соглашение с MCP HEK GmbH (впоследствии переименованной в MTT Technology GmbH, а затем в SLM Solutions GmbH). На сегодняшний день Дитер Шварце сотрудничает с SLM Solutions GmbH, а Маттиас Фокеле основал конкурирующую компанию ReaLizer GmbH.

Процесс печати начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои толщиной от 20 до 100 микрон. Готовый файл в стандартном формате STL используется в качестве чертежей для построения физической модели.

Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность, как правило металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (например, аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избежать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка проводится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал (рис. 2.30).

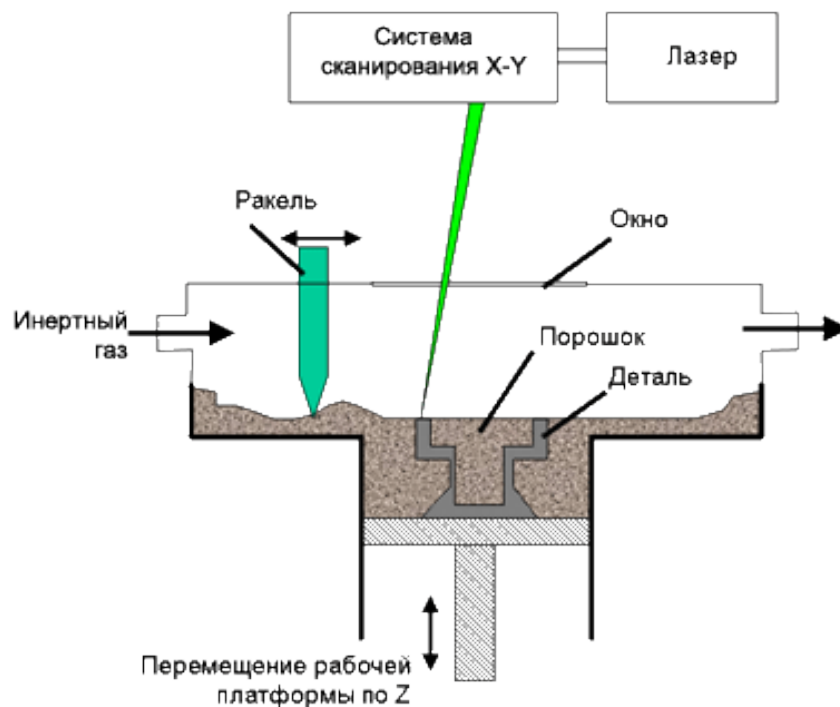


Рис. 2.30. Схема процесса селективного лазерного плавления

Технология выборочной лазерной плавки применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями. Возможность комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте полезна при создании имплантатов, например ацетабулярных чашек или других ортопедических имплантатов с пористой поверхностью, способствующей остеоинтеграции (сращиванию с костной тканью). Кроме того, селективное лазерное плавление успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.). Качество готовых изделий настолько высоко, что механическая обработка готовых моделей почти не требуется. Побочным положительным эффектом служит экономия материалов, так как селективное лазерное плавление в силу своей специфики является практически безотходным производством.

В ходе испытаний NASA было установлено, что детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25, изготовленные из никелевых сплавов методом SLM, несколько уступают по плотности материала аналогам, изготовленным литьем с последующей сваркой компонентов. С другой стороны, отсутствие сварочных швов благоприятно влияет на прочность изделий.

2.15. Селективное тепловое спекание

Селективное (выборочное) тепловое спекание (SHS) – метод аддитивного производства. Технология основана на плавке слоев термопластического или металлического порошка с помощью теплового излучателя.

По окончании формирования слоя рабочая платформа передвигается вниз на дистанцию, соответствующую толщине одного слоя, после чего новый слой порошка наносится с помощью автоматизированного ролика, а затем проводится спекание нового слоя по контурам, заданным цифровой трехмерной моделью (рис. 2.31). Лучше всего технология SHS подходит для производства недорогих функциональных прототипов.

Селективное тепловое спекание схоже с селективным лазерным спеканием (SLS). Единственное существенное различие между этими двумя методами заключается в использовании тепловой печатающей

головки вместо лазерной. Такое решение позволяет снизить стоимость и габариты печатающих устройств, вплоть до возможности создания настольных принтеров. С другой стороны, энергетическая отдача SHS-устройств мала по сравнению с лазерными 3D-принтерами, что существенно ограничивает выбор материалов.

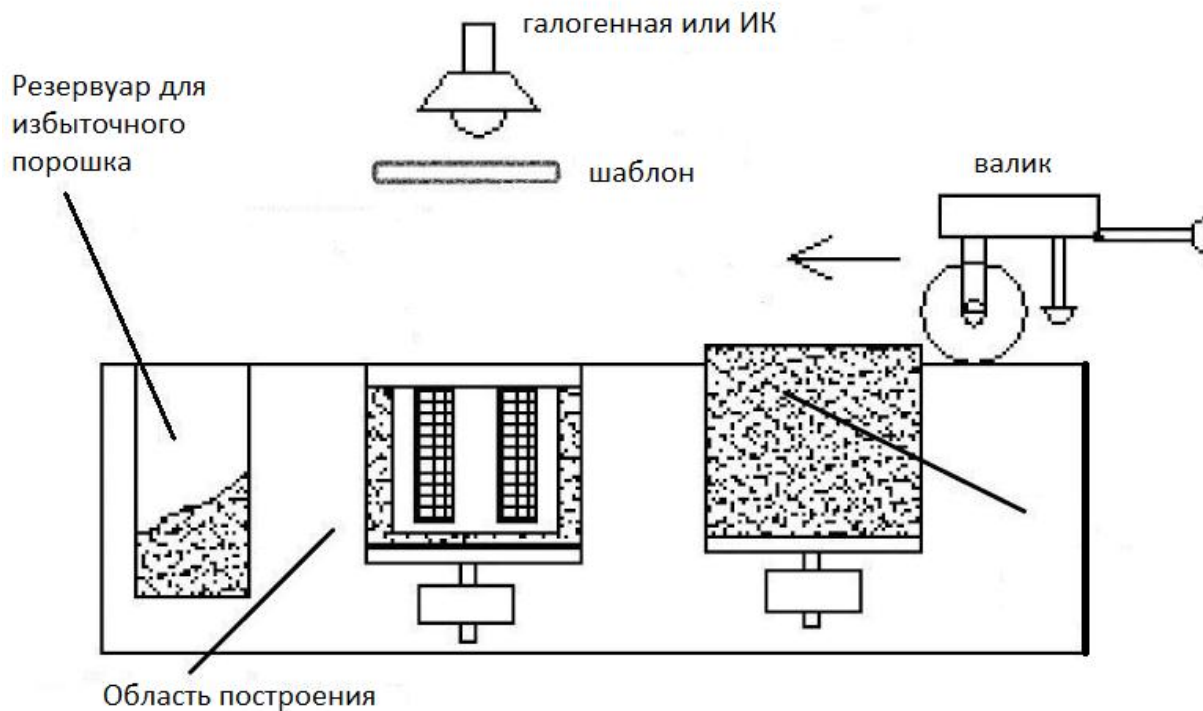


Рис. 2.31. Схема процесса селективного теплового спекания

Одним из основных преимуществ метода теплового спекания является то, что для определенной длины волны ИК-излучения всегда существует возможность подобрать 2 вида материала: один из которых будет пропускать тепло, а другой будет его поглощать. Таким образом, комбинируя эти материалы при производстве изделия можно достигать значительной сложности и многообразия его форм.

Селективное лазерное спекание – это настоящий прорыв в скоростной трехмерной печати. Важно подчеркнуть, что модель формируется из порошка, причем весь неиспользованный порошок можно использовать повторно. Данная технология позволяет изготавливать модели самых сложных геометрических форм, а также позволяет печатать несколько деталей одновременно.

Как правило, в качестве расходных материалов используются термопластичные полимеры или достаточно легкоплавкие металлы.

В последнем случае модели зачастую требуют дополнительного обжига для повышения прочности.

2.16. Селективное лазерное спекание

Селективное (выборочное) лазерное спекание (SLS) – метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. Метод SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей.

Технология выборочного (селективного) лазерного спекания (SLS) была разработана Карлом Декардом и Джозефом Биманом из Университета Техаса в Остине в середине 1980-х годов. Исследования финансировались Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA). Впоследствии Декард и Биман были вовлечены в компанию DTM, образованную для продвижения технологии SLS на рынок. В 2001 году DTM была выкуплена конкурирующей компанией 3D-Systems. Последний из патентов по технологии SLS был заявлен 28 января 1997 года. Его срок действия истек 28 января 2014 года, что делает технологию общедоступной.

Аналогичный метод был запатентован Р. Ф. Хаусхолдером в 1979 году, но не получил коммерческого распространения.

Технология SLS подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта (рис. 2.32). В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели (т.н. «сканирования») с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели.

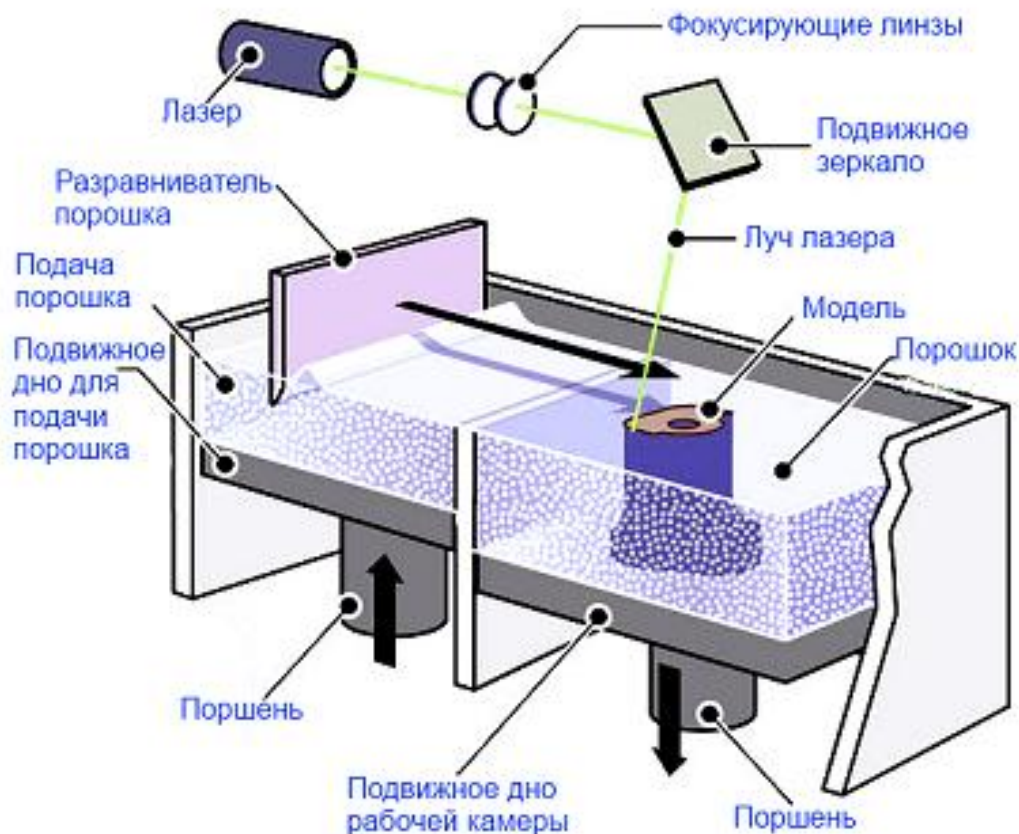


Рис. 2.32. Схема процесса селективного лазерного спекания

Так как плотность изделия зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед началом печати расходный материал подогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить процесс спекания.

В отличие от таких методов аддитивного производства, как стереолитография или моделирование методом послойного наплавления, селективное лазерное спекание не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

Некоторые SLS-устройства используют однородный порошок (как при прямом лазерном спекании металлов), производимый с помощью барабанно-шаровых мельниц, но в большинстве случаев используются композитные гранулы с тугоплавким ядром и оболочкой из материала с пониженной температурой плавления.

В сравнении с другими методами аддитивного производства селективное лазерное спекание отличается высокой универсальностью в

плане выбора расходных материалов. Сюда входят различные полимеры (например, нейлон или полистирол), металлы и сплавы (сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и др.), а также композиты и песчаные смеси.

Технология селективного лазерного спекания получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы. Несмотря на то, что технология создавалась для быстрого прототипирования, в последнее время селективное лазерное спекание применяется для мелкосерийного производства готовых изделий (рис. 2.33). Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало использование технологии для создания предметов искусства.



Рис. 2.33. Изделие, полученное по методу SLS

В то же время твердофазное селективное лазерное спекание имеет ряд недостатков. Так для более полного протекания объемной и поверхностной диффузии, вязкого течения и других процессов, имеющих место при спекании порошка, требуется относительно длительная выдержка под лазерным излучением. Это приводит к длительной работе лазера и малой производительности процесса, что делает этот процесс экономически нецелесообразным. Помимо этого, возникают сложности с поддержанием температуры процесса в интервале между точкой плавления и температурой твердофазного спекания.

Преимуществом твердофазного селективного лазерного спекания является возможность использования более широкого круга материалов для изготовления изделий.

Глава 3

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Программное обеспечение для 3D-печати очень разнообразно. Описать все существующие программы практически нереально. Поэтому в этой главе мы постараемся классифицировать наиболее популярные программные средства 3D-печати по функциональному назначению и представить их краткое описание.

Сегодняшнее программное обеспечение (ПО) для 3D-печати позволяет практически полностью автоматизировать печатный процесс и значительно упростить обращение с высокотехнологичной техникой.

Программное обеспечение для работы с аддитивной техникой, делится на три группы:

- 1) программы для объемного сканирования и моделирования;
- 2) программы для вывода на печать созданных 3D-моделей;
- 3) программное обеспечение, применяемое для управления печатным оборудованием.

Программное обеспечение, применяемое для работы с трехмерными принтерами, постоянно совершенствуется. Разработчики стремятся повысить эффективность автоматизации рабочих процессов.

3.1. Программное обеспечение для трехмерного моделирования

Обязательным условием для начала трехмерной печати является наличие цифровой модели планируемого к печати изделия. Существует несколько способов получения такой модели:

- поиск в каталогах готовых 3D-моделей, содержащихся в большом количестве в сети Интернет;
- создание трехмерной модели объекта с помощью какого-либо 3D-редактора;
- сканирование существующего объекта.

Конечно же, проще всего отсканировать уже существующий объект. Есть два варианта сканирования объектов:

- сканирование с использованием 3D-сканера и программного обеспечения, поставляющегося в комплекте с ним;
- использование фотоаппарата и специальных программ захвата трёхмерных моделей объектов по их фотографиям (например, Autodesk 123D Catch).

Если у вас имеется 3D-принтер, но нет 3D-сканера или программа для захвата цифровых моделей реально существующих объектов не обеспечивает надлежащей точности, или объект, который вы хотите распечатать, пока что существует только в вашем воображении, стоит воспользоваться специализированной программой для построения трехмерных моделей – 3D-редактором. Даже если вы сканируете реальный объект с помощью сканера, скорее всего вам захочется его доработать. Поэтому сегодня 3D-редактор – необходимый инструмент для всех, кто хочет печатать уникальные и необычные модели.

Зачастую в качестве 3D-редакторов применяются системы автоматизированного проектирования или системы автоматизированного дизайна (сокращенно САПР и CAD). Стоит отметить, что отечественный термин САПР является более широким по сравнению с англоязычным термином CAD. Так, в перечень САПР помимо CAD-систем включаются CAE (computer aided engineering) – системы расчетов и инженерного анализа, CAM (computer aided manufacturing) – системы проектирования технологических процессов производства, PDM (product data management) - системы координации и управления проектными данными, SCM (supply chain management) - системы управления цепочками поставок материалов и комплектующих.

Наиболее популярные системы автоматического проектирования, применяемые в трехмерной печати, представлены в табл. 3.1.

Существует множество форматов файлов для моделей, но большинство 3D-принтеров использует STL-формат. К сожалению, не все STL-файлы могут быть распечатаны. Модель, подходящая для печати, должна иметь «герметичную» форму с закрытой монолитной поверхностью, без каких-либо разрывов, которая четко разделяет внутреннюю и внешние части модели. Программы компьютерной графики (такие, как Blender) обычно моделируют поверхность, не заботясь о «герметичности» модели. Поэтому новичкам рекомендуется на первых порах использовать программное обеспечение, специализированное на создание монолитных моделей, например, 123 Design.

Таблица 3.1

САПР, применяемые в 3D-печати

Программа	Разработчик	Год издания	Цена	Примечания
1	2	3	4	5
Blender	Blender Foundation	1999	Free	Широко известная и признанная, мощная программа с открытым исходным кодом. Огромное сообщество пользователей. Легка в освоении
SketchUp	Trimble	2000	0/\$590 (pro)	Хороший баланс простоты в использовании и функциональности. Встроенная функция обмена 3D-моделями имеет большое сообщество пользователей. Нет родной поддержки STL
FreeCAD	Juergen Riegel, Werner Mayer	2002	Free	Очень мощная параметрическая CAD-платформа с открытым кодом, сфокусированная на инженерном использовании. Набор функций конкурирует с профессиональной линейкой CAD-программ
OpenSCAD	Cliffird Wolf, Marius Kintel	2009	Free	Модели создаются текстовыми скриптами, напоминающими программирование

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5
Sculptris	Tomas Pettersson/ Pixologic	2010	Free	Использует принцип придания формы модели по аналогии с лепкой глиной, путем «защипывания», «выглаживания» и т.д. Возможно коммерческое использование
Tinkercad	Tinkercad Inc./Autodesk	2011	Free	Удобный браузерный инструмент для обучения и несложного моделирования
123D Design	Autodesk	2011	То же	Младший брат для Autodesk Inventor. Усовершенствованная программа для монолитного моделирования 3D-объектов для PC, Mac, web и iPad
123D Sculpt	Autodesk	2011	—//—	Расширяет возможности моделирования для интерфейса с применением сенсорного экрана iPad.
123D Creature	Autodesk	2013	—//—	В интуитивно понятном дружелюбном интерфейсе iPad данное приложение позволяет создавать собственные трехмерные персонажи, моделировать их внешний вид и текстуру
Cubify Invent	3D-Systems	2012	\$49	Программное обеспечение, позволяющее создавать монолитные 3D-модели с учетом последующей 3D-печати
Cubify Sculpt	3D-Systems	2013	\$129	Программа для моделирования методом «лепки», спроектированная специально для 3D-печати. Поддерживает импорт и экспорт файлов STL формата. Поддерживаемая ОС-Windows

Рассмотрим наиболее популярные современные программные средства трехмерного моделирования.

1. Autodesk 3Ds Max. Крайне функциональная программа. С ней можно реализовать любую задумку, поэтому она так популярна среди инженеров и дизайнеров. Удобно, что в сети есть множество бесплатных уроков, с которыми вы быстро обучитесь работе с софтом. Правда, это программа поверхностного моделирования, т. е. с ее помощью создаются объекты, не пригодные для объемной печати.

2. SolidWorks. Своеобразная твердотельная альтернатива предыдущему софту. С ее помощью создаются изделия с изначально заполненным внутренним пространством. Программа также поможет оцифровать двухмерные чертежи.

3. Autodesk 123D Design. Эта бесплатная программа с хорошим функционалом и крайне удобным интерфейсом. Один из лучших трехмерных редакторов для начинающих, так как программа очень проста в освоении. Минус – отсутствие бесплатных уроков.

4. Google SketchUp (рис. 3.1; табл. 32). Для создания 3D-моделей принтеру необходимо получить описание того, что оператор должен получить в результате. Такие описания, как правило, создаются с использованием CAD-программ, что в настоящее время является довольно дорогим удовольствием. Но чаще всего для решения задачи вполне достаточно будет и бесплатного программного обеспечения Google SketchUp. В её работе вначале используется свой собственный формат SKP. Затем с помощью специального плагина этот формат конвертируется в STL.

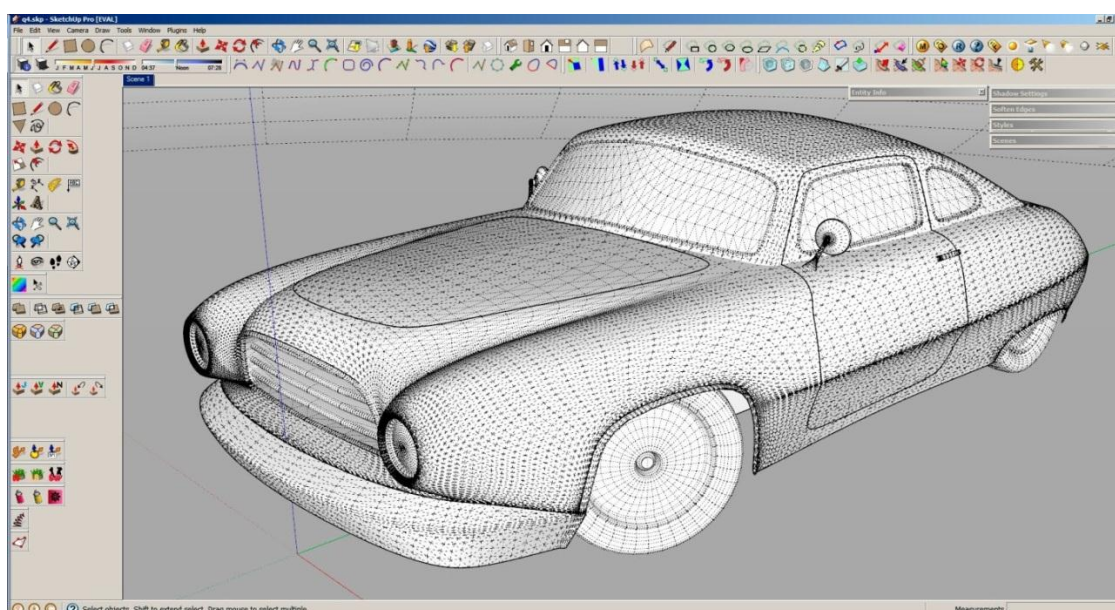


Рис. 3.1. Интерфейс программы Google SketchUp

Одним из неоспоримых достоинств программы SketchUp является целый набор запатентованных разработчиками инструментов, которые делают работу с программой лёгкой и результативной.

Таблица 3.2

Функциональные особенности Google SketchUp

Функция	Результат применения
Инструмент "Тяни/Толкай"	Плоская поверхность превращается в 3D (например, можно превратить квадрат в куб)
Точные измерения	В 3D-печати одним из основных параметров, который гарантирует нужный результат, является точность в измерениях. В данном случае это требование выполняется на очень высоком уровне
Работа с другими программами	При работе с версией SketchUp Pro можно экспортировать геометрию модели, например, в 3ds MAX или AutoCAD
Инструмент "Ведение"	С помощью данного инструмента есть возможность создания 3D формы путём экструзии (выдавливания) 2D поверхности вдоль заданных линий
Функция сечений SketchUp	Использование данной возможности позволяет пользователю "заглянуть внутрь" проектируемого объекта
Функция "Сцены"	С её помощью можно вращать и перемещать плоскости сечений. Также есть возможность отдельно сохранить нужные для дальнейшей работы виды модели
Инструменты "Осмотреть" и "Проход"	Проектируемую модель можно увидеть изнутри с помощью данных инструментов навигации
Инструменты "Песочницы"	Позволят создать, адаптировать или изменить плоское изображение местности в 3D (можно добавить уступы, автотрассы, долины, создать гладкий ландшафт)
Импорт 3DS.	Возможность работы с моделями, которые уже имеются в другом формате, путём простого импорта

Окончание табл. 3.2

Функция	Результат применения
Импорт изображений	Возможен импорт изображений, имеющихся в форматах JPG, PNG, TIFF и PDF.
Экспорт файлов	С использованием данной программы можно экспортировать растровое изображение (не более 10 тысяч пикселей) в форматах JPG, PNG, TIFF.

5. Программное обеспечение Zprint. Этот вид программного обеспечения поставляется в комплекте с 3D-принтерами от Z-Corporation. Процесс трехмерной печати, осуществляемый с помощью данного ПО, сходен с уже рассмотренными печатными процессами. Программное обеспечение от Z-Corporation характеризуется следующими возможностями:

- экспорт ZPR-файлов;
- ориентация детали;
- оценка времени печати;
- фиксирование;
- укрепление;
- установка трёхмерной печати;
- обнаружение коллизии;
- изготовление контрольной детали;
- трёхмерная визуализация;
- двухмерный режим;
- масштабирование, вращение и выравнивание;
- инструменты для обслуживания;
- печать.

Поставляющаяся в комплекте программа Zedit предоставляет огромные возможности допечатной подготовки:

- изменение цвета поверхностей;
- добавление комментариев и меток;
- проверка качества элементов модели;
- разбиение модели на части с последующей возможностью их независимой печати и соединения (для этого программа добавляет в нужных местах штырьки и ответные пазы);
- проверка пригодности модели для печати;

- проверка возможности выполнения элементов модели пустотелыми.

6. *Materialise Magics*. Сущностью быстрого прототипирования является качественные и быстро изготовленные детали. Данная программа отслеживает все возможные проблемы и помогает получить желаемый результат. Её работа начинается с этапа импортирования данных и заканчивается на подготовке платформы. *Materialise Magics* – программа, которая ориентирована на работу с сеточными оболочками и позволяет в автоматическом режиме исправить различные ошибки и дефекты в теле STL-файла. Такие ошибки могут появиться после сохранения модели в формате STL. "Отвалившиеся" части поверхностей или выродившиеся в линии мелкие поверхности могут стать настоящей проблемой. Но с помощью данного ПО это легко "лечится".

Все функции, которые может выполнять *Materialise Magics*, можно сгруппировать следующим образом:

- редактирование STL-файлов (прибавление или уменьшение объёма, создание отверстий, из отдельных объектов можно создать единую модель, создание цилиндров, сфер, конусов, обнаружение сдвоенных поверхностей);
- восстановление STL-файлов (пропущенные треугольники или дефектные файлы, восстановление отдельных разъединённых оболочек, создание новых треугольников, неподогнанные части модели легко восстанавливаются).

7. On-line сервис *Tinkercad* предназначен для обеспечения возможности создания 3D-моделей непосредственно в приложении, которое работает в браузере. Затем можно передавать его на печать. Эта разработка основана на базе WebGL, что даёт пользователю возможность работать с данным сервисом без необходимости установки дополнительных приложений. Вполне достаточно браузера, который поддерживает WebGL (Opera 12 Alpha, Firefox или Chrome). Модели, созданные с помощью *Tinkercad*, можно загрузить на локальный диск или сохранить на сервере. Сервис работает с *i.Materialise*, *Shapeways* и *Ronoko* (сервисами 3D печати), а также принтерами *MakerBot*. *Tinkercad* является бесплатным при его некоммерческом использовании.

8. *Solidworks Standard*. Данная программа имеет два основных направления работы: гибридное параметрическое моделирование и проектирование изделий при специфических условиях изготовления (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Характеристики Solidworks Standard

Гибридное параметрическое моделирование	Проектирование изделий при специфических условиях изготовления
Моделирование поверхностей	Пресс-формы и штампы
Твердотельное моделирование	Листовой материал
Каркасное моделирование	Металлоконструкции
Импортированная геометрия	Детали из пластмасс
Редактирование с использованием параметров и истории проектирования модели	—
Прямое редактирование	—
Использование вспомогательной геометрии	—

Также данное программное обеспечение даёт возможность пользоваться такими функциями, как:

- библиотека проектирования;
- экспресс-анализ;
- экспертные системы;
- оформление чертежей в ЕСКД;
- анимация;
- трансляция данных.

9. OpenSCAD – программное обеспечение, которое предназначено для создания твердотельных 3D САПР-объектов. Эта программа – то, что нужно, если необходимо создать 3D модель детали машины. OpenSCAD работает путём чтения файла сценария, в котором описан объект, а затем она строит 3D модель. В результате у пользователя имеются полный контроль над процессом, возможность менять следующий шаг или в процессе моделирования, или при производстве параметрических конструкций.

OpenSCAD работает по двум основным методам:

- CSG – конструктивная сплошная геометрия,
- экструзия (выдавливание двухмерных контуров).

10. Компас-3D уже много лет является эталонной системой при трёхмерном моделировании твёрдых тел. Эта программа открывает

огромные возможности перед профессиональным пользователем для решения сложных задач, связанных с построением различных поверхностей. Для этого в ней имеется обширная внутренняя база библиотек и развитый инструментарий для работы с ними. Основной задачей системы Компас-3D является формирование модели 3D для детали, её сборочных единиц или отдельных элементов. По виду конструкций могут быть как типичные, так и нестандартные элементы.

При работе с полной версией КОМПАС-3D открываются следующие возможности:

- машиностроительное проектирование;
- применение в приборостроении (при создании принципиальных электрических схем, а также перечней элементов);
- строительное проектирование (является инструментом для создания, использования и хранения интеллектуальных строительных конструкций и элементов, а также включена библиотека для системы проектирования газоснабжения и проектирования систем электро-снабжения).

11. T-flex CAD 3D – идеальное решение для того, чтобы автоматизировать конструкторско-технологическую подготовку производства. Данная программа даёт пользователю надёжные и мощные инструменты, а также обеспечивает возможную интеграцию с самыми лучшими программами в данной области.

Возможности для пространственного моделирования:

- масс-инерционные характеристики трехмерных сборочных конструкций и для твердых тел;
- визуализация трехмерных объектов (шейдинг, рендеринг, реберная модель и удаление невидимых линий);
- возможность получения точных чертежей по разрезам и видам 3D-модели;
- получение фотореалистичных изображений;
- анализ кривизны поверхностей;
- задание материалов, установка источников света, наложение текстур, установка «камер».

Многообразие различных функций и возможностей для получения нужного результата позволяет выбрать для работы именно то программное обеспечение, которое поможет сделать проектирование и печать на 3D-принтере быстрыми, удобными и эффективными.

12. FreeCAD – параметрический трехмерный редактор, позволяющий создавать объемные модели и чертежи их проекций. Пригодится всем, кто хочет ознакомиться с трехмерным моделированием и

анимацией, прежде чем перейти к более сложным программам. Это относительно простая система для трехмерного проектирования, оснащенная средствами моделирования движения (рис. 3.2). Помимо задач проектирования, программа пригодится для освоения геометрии, кинематики, динамики, принципов построения механизмов и моделирования физических процессов.

Распространяется FreeCAD бесплатно. Существуют версии программы для различных операционных систем.

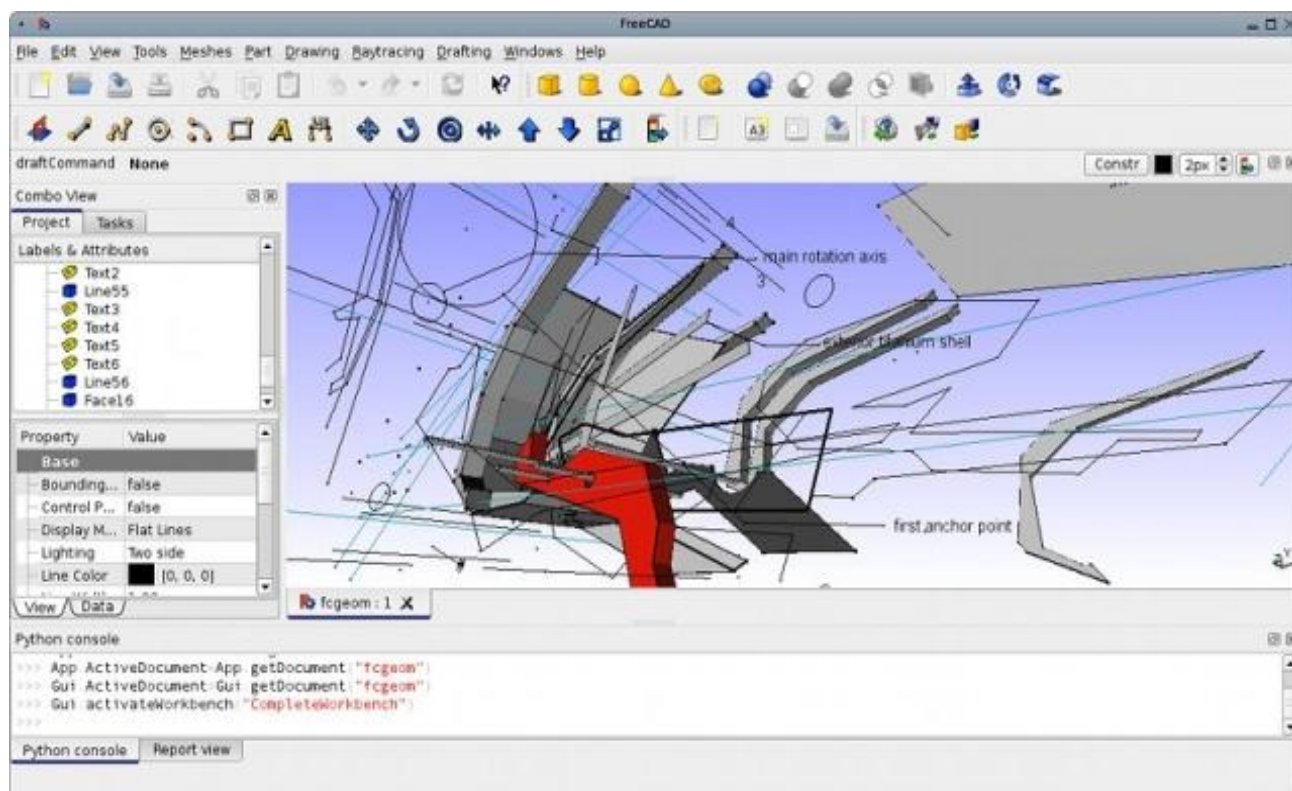


Рис. 3.2. Интерфейс программы FreeCAD

Кроме классических программ, многие дизайнеры пользуются онлайн-редакторами. Если у вас есть 3D-принтер, программа для моделирования может быть использована и в интерактивном режиме:

- 3DTin - удобный и стильный трехмерный редактор, который поддерживает русский язык;
- 123D Design - функциональный трёхмерный редактор;
- Thinkercard – редактор, который ориентируется в основном на детскую аудиторию, совмещен с галереей трехмерных объектов.

3.2. Программы для вывода на печать созданных 3D-моделей

Программное обеспечение печати готовых 3D-моделей состоит из трех частей (рис. 3.3):

- интерфейс;
- слайсер;
- прошивка контроллера.

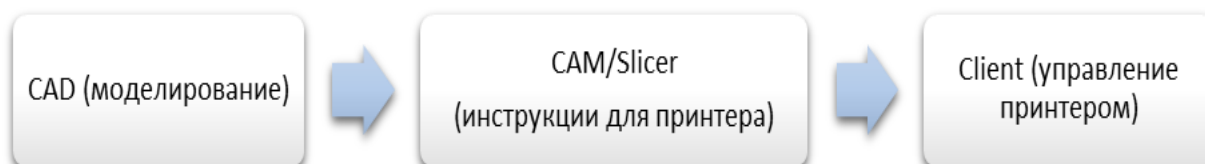


Рис. 3.3. Программное обеспечение 3D-печати

Интерфейс пользователя – это та программа, которая отправляет на 3D-принтер код, согласно которому и происходит распечатывание модели. В этой программе можно выставить температуры нагрева рабочего стола и экструдера, подать или вытащить пластик, переместить печатающую головку и стол в ручном режиме, настроить протокол обмена, соединиться с принтером и отправить модель на печать. Существует два широко известных интерфейса для 3D-принтеров:

- Repetier Host;
- Printron Pronterface.

Первая программа развивается европейской компанией, вторая – энтузиастом-одиночкой и некоммерческой группой программистов в системе GitHub. Обе программы находятся в свободном, некоммерческом доступе.

Интерфейс отправляет на 3D-принтер так называемый G-код – программный язык, разработанный для станков с ЧПУ. А как получается, что загружаем мы трёхмерную STL-модель, а на принтер отправляется G-код? Кто преобразует модель в G-код? Этим занимается программа-слайсер.

Чтобы приступить к печати объекта, 3D-принтеру необходимо получить входящий сигнал в виде так называемого G-кода – программного языка, разработанного специально для станков с ЧПУ. Таким образом, для начала печати информация о 3D-модели из формата

STL должна быть перекодирована с помощью G-кода. Этим занимается программа-слайсер.

Слайсер (от английского slice – кусочек, ломтик, срез) «разрезает» 3D-модель по слоям и задаёт перемещения экструдерной головки, а также порядка 100 параметров, которые характеризуют толщину и температуру слоя, механические и электронные характеристики конкретного 3D-принтера, наличие или отсутствие поддержек и т.д. Каждая из этих характеристик критически влияет на качество печати. Наиболее распространенные виды слайсеров представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Основные виды слайсеров

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Skeinforge	Enrique Perez	2009	Free	Данная программа предоставляет отличные возможности настройки за счет большого количества функций, однако по этой же причине интерфейс может показаться несколько запутанным
Slic3r	Alessandro Ranelucc	2011	Free	Является одной из самых популярных slicer программ, сменив на этом месте Skeinforge. Имеет открытый код, поддерживает различные операционные системы, быстрая и простая в использовании
Cura	David Braam/ Ultimaker	2012	Free	Встроенный CAM/client для 3D принтеров Ultimaker и некоторых других. Одна из наиболее быстрых slicer программ на сегодняшний день. Осуществляет «нарезку» слоев в фоне и автоматически корректирует результат в случае внесения каких-либо изменений. Экспортирует файлы формата G-code.

Окончание табл. 3.4

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
KISSlicer	Jonathan Dummer	2012	Free (42)	Pro – версия поддерживает печать несколькими экструдерами и другие продвинутое возможности
MakerWare	MakerBot	2013	То же	Встроенный CAM/client для 3D-принтеров Replicator. Экспортирует файлы формата G-code.

При 3D-печати мы имеем дело со сложными термодинамическими процессами. Если не учитывать все детали, созданная модель будет коробиться, слои будут наезжать друг на друга, части модели будут провисать, геометрические формы нарушаться, а после много-часовой печати модель просто отлипнет от рабочего стола на последних минутах работы, отправив в утиль ваше время, а, возможно, и надежду когда-либо отладить процесс. Это гораздо сложнее печати на бумаге краской.

Программы уровня CAD и CAM служат для создания трехмерных цифровых моделей и их перевод в физические инструкции для принтера; в то время как программы типа *client* (табл. 3.5) осуществляют управление аппаратным оборудованием принтера.

Таблица 3.5

Некоторые виды программ типа «Client»

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Replicator G	MakerBot	2008	Free	Изначальный клиент принтеров Replicator, впоследствии замещенный MakerWare.
Printerface	Kliment Yanev	2011	Free	Наиболее известная из 3 утилит популярного набора Printron. Требуется Python. Несколько запутанная установка

Окончание табл. 3.5

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Repetier-Host	Hot world Media Gmbh	2011	Free	Одна из самых популярных client-программ с открытым кодом. Предлагает продвинутый графический интерфейс с возможностью вращать модели, а также визуализатор траекторий движения печатающей головки, позволяющий посмотреть, как именно будет двигаться экструдер, печатая модель. Требуется Python. Доступен автоустановщик.
Octoprint	Gina Haussge	2011	Free	Браузерный интерфейс, предлагающий управление, мониторинг и G-code-визуализацию «из любого места»
UP / Afinia 3D	PP3DP	2012	Free	Встроенная САПР (CAM/client-программа) для UP-принтеров. Не экспортирует файлы

Программа “*Client*” – это в основном своего рода панель управления принтером. Она посылает в принтер САМ инструкции и предоставляет интерфейс для управления функциями принтера. В настоящее время наметилась тенденция объединения САМ- и client-программ в единый интерфейс управления принтером.

Прошивка контроллера – часть программного обеспечения, которая «отвечает» за распознавание G-кода и отдачу команд непосредственно электро-механическим устройствам – двигателям, вентиляторам, нагревателям. Необходима чёткая настройка на характеристики конкретного 3D-принтера – передаточные числа шестерён, диаметры валов, размеры площадок и т.д.

В совокупности эти три части программного обеспечения для 3D-принтера дают сотни нетривиальных комбинаций, разобраться в которых человеку, которому просто надо распечатать модель, достаточно сложно. Обычно на налаживание процесса 3D-печати уходит не одна неделя. И это в том случае, если вы покупаете принтер с адаптированным программным обеспечением. Если же производитель не взял на себя труд адаптировать программы для своего 3D-принтера и рекомендует пользоваться обычными, некоммерческими программами (freeware), то необходимо понимать, что этот труд вы возьмёте на себя. Более того, даже если производитель предоставляет адаптированную программу – интерфейс, то это совершенно не означает, что вам не придётся заниматься настройками слайсера.

При работе с 3D-принтером используют:

- язык STL (для описания поверхности заданной модели используются треугольники);
- язык X3D (отсчёт идёт от заранее заданного профиля, построен на XML-стандарте);
- стандарт VRML (работает с треугольниками, в которых нет общих точек).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Все о 3D-печати. URL: <http://www.itemprint.ru>.
2. Грищенко В.К., Маслюк А.Ф., Гудзера С.С. Жидкие фотополимеризующиеся композиции, Киев: Наукова Думка, 1985.
3. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / Э. Канесса, К. Фонда, М. Зеннаро. Международный центр теоретической физики Абдус Салам. 2013. 191 с.
4. Зленко М.А. Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // пособие для инженеров. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
5. История и технологии трехмерной печати / Н.В. Кушнир, А.В. Кушнир, А.М. Геращенко, А.В. Тыртышный // Научные труды КубГТУ. Краснодар: №5. 2015.
6. Новости 3D-печати и 3D-сканирования. URL: <http://3d-daily.ru>
7. Применение 3D-принтеров в машиностроении. URL: <http://www.printcad.ru/primeneniya-3d-printerov/mashinostroenie.html>.
8. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук. URL: <http://www.proceedings.spiras.nw.ru/data/src/2010/15/00/spy>.
9. Технологии 3D-печати. Принципы, возможности, расходные материалы, цены // URL: http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml.
10. Энциклопедия 3D-печати. URL: <http://3dtoday.ru/wiki>.
11. Шнелл Г., Химия и физика поликарбонатов // пер. с англ., М., 1967.
12. 3D-печать, литьё, мехобработка ЧПУ, лазерная резка. URL: <http://www.3dprintspb.com>.
13. 3D-принтеры. URL: <http://www.3dnews.ru/peripheral/3d-print/print>.
14. Barnatt C. 3D-Printing: Second Edition / CreateSpace Independent Publishing Platform. 2014. 306 p.
15. Barnatt C. 3D-Printing: The Next Industrial Revolution / Barnatt C. - ExplainingTheFuture.com. 2013. 276 p.
16. Evans B. Practical 3D-Printers: The Science and Art of 3D-Printing/ Evans B. – Apress. 2013. 332 p.

17. Hausman K. 3D-Printing For Dummies / For Dummies. 2014. 384 p.
18. Kelly J. F. 3D-Printing: Build Your Own 3D-Printer and Print Your Own 3D-Objects/ Que Publishing. 2013. 192 p.
19. Kallendorf C.J. Radiation Curing Primer I: Inks, Coatings and Adhesives, Second Edition/ RadTech International North America, 1991.
20. Larson H. Fabricated: The New World of 3D-Printing / H. Larson, M. Kurman – Wiley. 2013. 280 p.
21. McMahon C. 3D-Printing: Second Edition/Imagine Publishing Ltd. 2013. 116 p.
22. Sheppard K. 3D-Printing – Unabridged Guide/Tebbo. 2012. 174 p.

Учебное издание

*Алексей Евгеньевич Шкуро
Павел Сергеевич Кривоногов*

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

Учебное пособие

ISBN 978-5-94984-616-2



Редактор А.Л. Ленская
Компьютерная верстка О.А. Казанцевой

Подписано к использованию 27.04.2017
Уч.-изд. л. 5,31 Усл. печ. л. 5,81
Тираж 100 экз. (Первый завод 50 экз.)
Объем 5,07 Мб.
Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
Тел.: 8(343)362-91-16